**Mafalda Filipa Almeida Aleixo Lopes**

# Aplicação de VANT em estudos geomorfológicos dos litorais rochosos: o exemplo de S. Paio, Vila do Conde

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território orientada pela Professora Doutora Maria da Assunção Ferreira Pedrosa de Araújo

Faculdade de Letras da Universidade do Porto

Setembro de 2015

# Aplicação de VANT em estudos geomorfológicos dos litorais rochosos: o exemplo de S. Paio, Vila do Conde

Mafalda Filipa Almeida Aleixo Lopes

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território orientada pela Professora Doutora Maria da Assunção Ferreira Pedrosa de Araújo

## Membros do Júri

Professor Doutor Augusto Pérez-Alberti
Facultad de Geografía e Historia - Universidad de Santiago de Compostela

Professor Doutor António Alberto Teixeira Gomes
Faculdade de Letras – Universidade do Porto

Professora Doutora Maria Assunção Ferreira Pedrosa de Araújo
Faculdade de Letras – Universidade do Porto

Classificação obtida: …. Valores

# Sumário

Índice de ilustrações ..... 9

Índice de quadros ..... 11

Lista de abreviaturas e siglas ..... 12

Introdução ..... 13

1.1. Enquadramento geral e objetivos ..... 13

1.2. Estrutura de trabalho ..... 14

Capítulo 2. – Revisão da Literatura ..... 15

2.1 Breve referência histórica sobre a deteção remota ..... 15

2.2 Veículos Aéreos Não Tripulados ..... 17

2.2.1. Segurança e Regulamentação ..... 20

2.2.2. UAV System ..... 23

2.3. Costas rochosas ..... 24

2.4. Estado da arte ..... 28

2.5. Caraterização da área de estudo ..... 34

2.5.1. Geografia ..... 34

2.5.2. Arqueologia ..... 37

2.5.3. Geologia e Geomorfologia ..... 39

Capítulo 3. – Metodologia de Investigação ..... 41

3.1. Aquisição de dados ..... 42

3.1.1. Trabalho de Campo ..... 42

3.2. Processamento de dados ..... 53

3.2.1. Structure-from-Motion e Dense Multi-View Stereo ..... 53

3.2.2. Agisoft PhotoScan ..... 60

3.2.3. Modelos digitais de elevação ..... 65

3.3. Interpretação de dados ..... 68

Capítulo 4. – Resultados....71
4.1. Esboço geológico....71
4.2 Esboço geomorfológico....74
Conclusão e perspetivas futuras....80
Referências bibliográficas....82
Anexos:....87
Anexo 1: Quadros síntese do Estado da Arte....88
Anexo 2: Cartografia temática....104

# Agradecimentos

O trabalho apresentado representa o culminar de uma etapa da minha vida. Tal etapa não teria sido concretizada, se eu não tivesse tido o apoio que obtive. Deste modo, é com enorme gratidão que expresso os meus sinceros e profundos agradecimentos:

Aos meus pais pelo esforço que fizeram, e pelas oportunidades que me proporcionaram. A vocês e ao Bruno, elementos essenciais na minha vida, estarei eternamente agradecida por todo o amor, carinho, interesse e paciência demonstrados. À minha família por todo a compreensão, ternura e apoio prestados, mesmo com a falta de atenção da minha parte nos últimos meses.

Aos docentes: Professora Doutora Maria Assunção Araújo, Professor Doutor António Alberto Gomes e Professor Doutor José Teixeira, pelo acompanhamento deste trabalho, e por todos os conselhos e os conhecimentos que me foram transmitidos.

À minha melhor amiga, Bárbara Ferreira, e aos meus queridos amigos do jardim-de-infância, Patrícia Sousa e Marco Sousa, pela positividade, e palavras de incentivo.

Aos meus amigos que caminharam comigo nesta jornada, que me ofereceram bons momentos e alento nos menos bons. À Catarina Maia, à Marlene Costa, ao Daniel Catalão, à Andreia Sousa, à Sofia Campos, ao Élio Silva, ao Daniel Sousa, ao André Oliveira, à Diana Sousa, à Paloma Lucena Moya, à Cláudia Costa Pereira e ao Mohamed Mohsen, por toda a ajuda, partilha de ideias, saberes e boa disposição.

À GeoElevação, representada pelo colega Miguel Marques, pelo manuseamento do drone e pela cedência dos dados fundamentais à realização deste projeto.

À Cláudia Coelho, por toda ajuda e disponibilidade na elaboração da cartografia geológica.

A todos que se cruzaram comigo e que me ajudaram, o meu sentido **Obrigada**!

# Resumo

Os veículos aéreos não tripulados (VANT, habitualmente designados por *drones*) marcaram uma revolução no campo da deteção remota, pelas suas características inovadoras e pela elevada proliferação. Tendo em conta as suas vantagens, este projeto apresenta um caso de aplicação de VANTs, como tecnologia de aquisição de dados aerofotogramétricos, para o reconhecimento geológico e geomorfológico. Associados aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), estes dados permitem a elaboração de cartografia muito detalhada, podendo enriquecer grandemente os estudos de Geomorfologia.

A área de estudo, a costa de São Paio localiza-se na freguesia de Labruge (Vila do Conde, NW de Portugal), consiste num trecho costeiro rochoso que se carateriza por dois afloramentos graníticos (Alto da Mota e Alto do Facho), separados por uma pequena praia (Praia dos Castros).

Dadas as características das imagens captadas (boa resolução e elevado grau de sobreposição), e recorrendo ao *Agisoft PhotoScan*, foram criados MDS e ortofotomapas de grande pormenor. Ao *software* foram adicionados pontos de controlos, recolhidos durante o trabalho de campo com o GPS, de modo a melhorar a precisão dos dados derivados. A dissertação procura entender como é realizado o processamento dos dados, a partir do qual as fotografias aéreas são transformadas em ortos e MDS, explorando a técnica *Structure-from-Motion* assim como o *workflow* do *Agisoft*. Para além disso, apresenta cartografia geológica e geomorfológica da área de estudo, construída a partir da fotointerpretação dos ortofotos, observação direta no terreno e ainda pela construção de perfis longitudinais obtidos com o MDS.

A utilização do VANT mostra-se bastante vantajosa, uma vez que o tempo despendido na recolha e no processamento dos dados são reduzidos. Os dados recolhidos podem ser processados no próprio local, permitindo a visualização do resultado final e facilitando a correção de erros através da repetição de voos.



**Palavras-chave:** VANT, Geomorfologia, SIG, Costa rochosa, S. Paio.

# Abstract

Unmanned aerial vehicles (UAV, commonly called drones) marked a revolution in remote sensing, for its innovative features and high proliferation. Taking into account its benefits, this project presents a case of application of UAVs, as aerial photogrammetric data acquisition technology to the geological and geomorphological recognition. Associated with Geographical Information Systems (GIS), these data allow the development of very detailed mapping, which can greatly enrich the studies of Geomorphology.

The study area, the coast of S. Paio is located in the parish of Labruge (Vila do Conde, NW of Portugal), consists in a rocky coast stretch which is characterized by two granite outcrops (Alto da Mota and Alto do Facho), separated by a small beach (Praia dos Castros).

Due to the characteristics of the captured images (good resolution and high degree of overlap), and using the Agisoft PhotoScan, were created DSM and orthophotomaps of great detail. Control points collected during the fieldwork with GPS were added to the software, in order to improve the accuracy of derived data. The dissertation aims to understand the processing of data that transformed the aerial photographs into orthophotos and DSM, exploring the Structure-from-Motion technique as well as the workflow Agisoft. In addition, it presents geological and geomorphological mapping of the study area, carried out from the photo-interpretation of orthophotos, direct observation in the field and also from longitudinal profiles obtained with DSM.

The use of the UAV appears to be quite advantageous, since the time spent in the collection and processing of data are reduced. The collected data can be processed on-site, allowing the visualization of the final result and facilitating the error correction through the repetition of flights.



**Keywords:** UAV, Geomorphology, GIS, Rock Coast, S. Paio.

# Índice de ilustrações

*Figura 1. Sistema VANT.* ..... *24*
*Figura 2. Perfis longitudinais das plataformas Tipo-A / B, e arriba mergulhante. Fonte: (Sunamura, T., 1992e, p. 140)* ..... *26*
*Figura 3. Pesquisa bibliográfica incidente nas temáticas de praias (costas arenosas) e costas rochosas no Web of Science (3/8/2015). Fonte: Elaboração própria (adaptado de Naylor, L. A. et al. 2010 ).* ..... *29*
*Figura 4. Temas abordados nas revistas, A. Geomorphology; B. Marine Geology.* ..... *30*
*Figura 5. Representação das classes dos materiais e métodos utilizados: A. revista Geomorphology; B. Marine Geology.* ..... *32*
*Figura 6. Localização do concelho de Vila do Conde e da freguesia de Labruge, no distrito do Porto.* ..... *35*
*Figura 7. Localização da área de estudo, S. Paio, no concelho de Vila do Conde.* ..... *36*
*Figura 8. A e B Praia dos Castros, vista do vértice geodésico (para norte -A), do passadiço para sul (B); C Castro de S. Paio (fonte:http://castrosgalaicos.blogspot.pt/2008/03/castro-de-s-paio-vila-do-conde.html); D Vértice geodésico; F Sinalização do Centro Interpretativo do S. Paio e da Área Protegida Regional do Litoral de Vila do Conde e da Reserva Ornitológica de Mindelo.* ..... *37*
*Figura 9. Workflow do projeto seguindo propostas de Sabins (2007) e Kaneko e Nohara (2014).* ..... *41*
*Figura 10. Folha n.º3, correspondente à área sul do S. Paio, onde foi esboçado um limite litológico entre granito e migmatito.* ..... *43*
*Figura 11. Realização de trabalho de campo. A. Recolha de pontos GPS; B. Monitorização do voo do drone; C. Desenho de perfis longitudinais; Reconhecimento e interpretação geológica e geomorfológica.* ..... *44*
*Figura 12. Cobertura fotográfica ao longo de uma faixa de voo. a) Condições durante a exposição; b) posição das fotografias resultantes. Fonte: adaptado de Lillesand, T.M. [et al.], 2004a, p.130.* ..... *45*
*Figura 13. Apresentação do VANT utilizado.* ..... *46*
*Figura 14. Maré de Leixões do dia do voo (12 de agosto) e dos dias anterior e posterior. Fonte: Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal, Departamento de Engenharia Geográfica – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa* ..... *47*
*Figura 15. Maré de Leixões do dia do voo (21 de Janeiro) e dos dias anterior e posterior. Fonte: Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal, Departamento de Engenharia Geográfica – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*..... *48*
*Figura 16. A. Condições para obter um bom DOP, os satélites alcançam um grande volume de céu. O valor de DOP é baixo. B. Os satélites estão amontoados numa parte do céu, indica um mau DOP, o valor é alto. Fonte: adaptado de Van Sickle, J. (2008).*..... *51*
*Figura 17. GPS LEICA SR20. A. Estação fixa; B. Recetor móvel ou Rover, com marcação de um ponto de controlo*..... *52*
*Figura 18. SfM de imagens da internet. O objetivo do projeto era construir modelos 3D de edifícios*

*através de imagens recolhidas na internet segundo Agarwal, S. [et al.], 2010, p. 41. ..... 53*
*Figura 19. Passos individuais de Sfm+MVS. Fonte: adaptado de Verhoeven, G [et al.] 2013. ..... 54*
*Figura 20. Deteção de elementos e correspondência. (a) A posição e a orientação de elementos de SIFT apresentados numa imagem da Fonte de Trevi. (b) A linha corresponde a um ponto da face da estátua central de Oceanus na Fonte de Trevi segundo Agarwal, S. [et al.], 2010, p. 43 ..... 55*
*Figura 21. a) Três imagens de um cubo a partir de pontos de vista. b) O cubo representa uma superfície a ser reconstruída com os pontos 3D (pontos coloridos) e imagens para a mesma coleção de imagens segundo Agarwal, S. [et al.], 2010, p. 42. ..... 56*
*Figura 22. Correspondência e distância euclidiana dos descritores (verde), tie points (vermelho). Fonte: http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/research/sculptures/ ..... 57*
*Figura 23. Bundle Adjustment. Fonte: adaptado de http://vindelman.net.technion.ac.il/research/incremental-light-bundle-adjustment-for-structure-from-motion-and-autonomous-navigation/ ..... 58*
*Figura 24. Exemplo de uma nuvem de pontos esparsa da área de estudo, na qual já se reconhece a superfície da cena. ..... 59*
*Figura 25. Workflow do software Agisoft PhotoScan. ..... 61*
*Figura 26. Distribuição dos pontos de controlo no modelo 3D (com base). ..... 62*
*Figura 27. Exemplo dos produtos derivados presentes no Processing Report do Agisoft PhotoScan. ..... 63*
*Figura 28. Distinção entre MDT e MDS. Fonte: http://aerometrex.com.au/blog/wp-content/uploads/2011/12/dsm_dtm_adelaide.jpg ..... 65*
*Figura 29. Etapas principais da modelação digital de terreno. Adaptado de Hutchinson, M.F. and Gallant, J.C. (2000). ..... 66*
*Figura 30. Modelo Digital de Superfície, elaborado no Agisoft Photoscan, da área de estudo elaborado com as fotografias do voo realizado em agosto 2014. ..... 67*
*Figura 31. Modelo TIN da área de estudo, elaborado no Agisoft Photoscan, que serviu de base para a concretização do MDS apresentado na Figura 30. ..... 67*
*Figura 32. Sequência estratigráfica do corte de S. Paio, altitude da base 5m. Fonte: Araújo, M.A. (1991). ..... 72*
*Figura 33. A. Esboço geológico da área costeira de S. Paio; Detalhes no ortofotomapa: B. Pormenor dos blocos rochosos situados no setor norte; C. Detalhe de um filão com uma espessura que varia entre 130 e 180 cm; D. Contacto litológico entre a rocha ígnea e a rocha metamórfica e detalhe dos filões. ..... 73*
*Figura 34. Diferentes litologias da área de estudo. A) Descontinuidades do granito de S. Paio; B) Cisalhamento direito (filão rejeitado); C) Filonetes; D) Contacto entre migmatito e o granito; E) Migmatito; F) Filão de lamprófiro. ..... 74*
*Figura 35. Modelo Digital de Superfície da área de estudo. ..... 75*
*Figura 36. Perfis longitudinais da área de estudo, elaborados a partir do MDS. ..... 76*

*Figura 37. Perfil esquemático do setor Alto do Facho.* ..... *78*
*Figura 38. Esboço geomorfológico. A) Praia encastrada; B) Promontórios do setor 2 do Alto da Mota; C) Marmita; D) Sequência estratigráfica (cf. Figura 32); E) Sapa fóssil; F) Sapa e plataforma de erosão marinhas atuais.* ..... *79*

# Índice de quadros

*Quadro 1. Especificidades do VANT usado neste estudo.* ..... *46*
*Quadro 2. Artigos da Geomorphology sobre costas rochosas (12 agosto 2015).* ..... *88*
*Quadro 3.Materiais e métodos utilizados nos artigos selecionadas da revista Geomorphology.* ..... *91*
*Quadro 4. Artigos da Marine Geology sobre costas rochosas (12 agosto 2015).* ..... *100*
*Quadro 5. . Materiais e métodos utilizados nos artigos selecionadas da revista Marine Geology* ..... *103*

# Lista de abreviaturas e siglas

DOP - Diluição de Precisão

dGPS - *Differential Global Positioning System*

GCP - *Ground Control Points*

GCS - *Ground Control Station*

GHz - Gigahertz

GNSS- *Global Navigation Satellite System*

ICAO - International Civil Aviation Organization

IMU – Inertial Measurement Unit

INE- Instituto Nacional de Estatística

IP – *Interest Points*

ISPRS - *The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*

LAAP – *Low-Altitude Aerial Photography*

MDE - Modelo Digital de Elevação

MDS - Modelo Digital de Superfície

MDT - Modelo Digital de Terreno

MVS - *Multi-view Stereo*

*RPAS - Remotely Piloted Aircraft System*

RTK - *Real Time Kinematic*

SfM – *Structure-from-motion*

SIFT - *Scale Invariant Feature Transform*

TIN – *Triangulated Irregular Network*

TLS - *Terrestial Laser Scanning*

UAV - *Unmaned Aerial Vehicles*

UAS - *Unmanned Aircraft Systems*

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

# Introdução

## 1.1. Enquadramento geral e objetivos

Os VANT (Veículos Aéreos Não Tripulados) ou *drones* são como o seu nome sugere, veículos capazes de voar sem a presença do piloto dentro da aeronave. Isto, significa que a nave é comandada por operadores que se encontrem no solo através de sinais de rádio ou de GPS.

Se a este veículo, concebido para voar a baixas altitudes, for adicionada uma câmara fotográfica, podem adquirir-se fotografias aéreas de grande resolução espacial (quando comparadas com as imagens de satélite ou até mesmo da fotografia aérea "convencional"). Todavia, a grande resolução, não é sinónimo de boa qualidade uma vez que as fotografias podem ficar desfocadas, assim para alcançar um bom resultado é preciso considerar vários parâmetros, tais como: condições meteorológicas, velocidade do aparelho, intervalo de tempo entre a captura das fotografias, etc… As fotografias adquiridas constituem a base de construção de vários produtos, tais como: modelos digitais de superfície e ortofotomapas. Como as fotografias têm uma boa resolução (que varia com a altitude do voo e da própria resolução da câmara), os produtos derivados possuem um elevado grau de pormenor, podendo ser observadas várias características como: contactos litológicos, descontinuidades, diversos elementos e formas geomorfológicas (ex: marmitas) no caso em estudo. Considerando todas as potencialidades que passam desde o custo até ao detalhe final obtido, são várias as áreas de estudo que aplicam este meio para obtenção dos seus dados, tais como: agricultura e indústria, serviços de busca e salvamento de pessoas, publicidade, cartografia, etc….

Assim, o objetivo deste trabalho é obter o máximo partido dos ortofotomapas e modelos digitais de superfície, obtidos através das fotografias verticais captadas pelo VANT, em prol do estudo das costas rochosas. Para além disso, e como objetivos específicos, este projeto pretende:

1. Apresentar o VANT como uma ferramenta inovadora de aquisição de dados, abordando o seu funcionamento;
2. Compreender (ainda que de uma forma relativamente superficial) a etapa de processamento com *software PhotoScan Agisoft*, com o intuito de saber como é que as fotografias são transformadas em ortofotos e MDS;
3. Explorar estes elementos de modo a cartografar a área de estudo, contribuindo para o seu conhecimento geomorfológico e geológico.

## 1.2. Estrutura de trabalho

Este trabalho encontra-se segmentado em três capítulos, que incluem diversos subcapítulos.

O segundo capítulo apresenta-se como uma revisão bibliográfica, focando-se nos temas: deteção remota, VANT e costas rochosas. Este capítulo é na sua essência teórico, uma vez que o seu propósito foi reunir o máximo de informação, de modo a construir uma reflexão teórica. A abordagem é efetuada de um ponto de vista que vai do geral até ao particular, isto é, inicia-se com uma introdução à deteção remota, torna-se mais específica quando aborda os VANT (ferramenta de deteção remota), aborda as costas rochosas (alvo do estudo apresentado), e por último (no Estado da Arte) tenta perceber quais os métodos e ferramentas utilizadas no estudo dos litorais rochosos e se a utilização de VANT se coaduna com as suas práticas. Por fim, é efetuada uma caraterização da área de estudo que engloba o seu enquadramento geográfico, geológico, e arqueológico.

O capítulo seguinte descreve a Metodologia de Investigação aplicada no desenvolvimento da dissertação e encontra-se dividido em três subcapítulos:

- Aquisição de dados, que envolve as idas ao terreno com vista à recolha de dados, a partir do VANT, do GPS e observação direta;
- Processamento de dados, onde é descrita de forma sucinta a técnica *Structure-from-Motion* e *Dense Multi-View Stereo*, na qual se baseia o *software Agisoft Photoscan* para a construção dos ortofomapas e dos MDS e são explicadas as etapas de trabalho do *Agisoft Photoscan*. Adicionalmente são clarificados os conceitos de modelo digital de elevação (MDE), modelo digital de superfície (MDS) e modelo digital de terreno (MDT);
- Interpretação dos dados, é abordada a fotointerpretação assim como vários os elementos de reconhecimentos que potenciam uma correta vectorização do ortofotomapa.

Por último, o quarto capítulo (Resultados) apresenta a cartografia geológica e geomorfológica conseguida através da interpretação dos ortofotomapas e dos modelos digitais de superfície, assim como a sua análise.

# Capítulo 2. – Revisão da Literatura

Esta etapa prolongou-se no decurso da realização deste projeto, e consistiu na recolha e leitura de artigos e livros, com objetivo de obter um forte fundamento teórico dos vários temas tratados nesta dissertação, dos quais se salientam: costas rochosas, literatura específica para os materiais e técnicas utilizadas (VANT, GPS, *PhotoScan Agisoft*), e ainda bibliografia própria da área de estudo.

A revisão bibliográfica foi potenciada com a pesquisa dos temas de interesse em plataformas de consulta académicas, tais como Google Académico e *Web of Science*. Aproveitando a disponibilidade das bases de dados *online*, foram igualmente recolhidos dados no Instituto Hidrográfico, *Weather UnderGround*, Instituto Nacional de Estatística, sítios oficiais da câmara municipal de Vila de Conde e freguesia de Labruge.

## 2.1 Breve referência histórica sobre a deteção remota

A fotografia nasce em 1839 com a divulgação pública dos processos fotográficos pioneiros de Nicéphore Niépce, William Henry Fox Talbot, e Louis Jacques Mande Daguerre. Um ano mais tarde (1840), o diretor do Observatório de Paris defende o uso da fotografia para levantamentos topográficos (Lillesand, T.M. [et al.], 2004d, p. 59). A primeira fotografia aérea conhecida foi captada em 1858, e constituí, igualmente, o primeiro registo de deteção remota. Foi realizada por Gaspard-Félix Tournachon e conseguida num balão a 80 metros do solo (Campbell, J.B. and Wynne, R.H., 2011, p. 7, 2004d, p. 59). A técnica foi-se desenvolvendo e adquirindo importância, de tal modo que Arthur Batut (pioneiro na fotografia aérea) publicou um trabalho sobre esta temática no ano de 1890 (Rees, W.G., 2001, p. 2).

O avião foi inventado em 1903, contudo só foi utilizado como uma plataforma para câmara fotográfica no ano de 1908, quando um fotógrafo, acompanhando Wilbur Wright capturou as primeiras fotografias aéreas em movimento sobre a cidade de Le Mans, França (Lillesand, T.M. [et al.], 2004d, p. 61). Mais tarde, em 1913, foram captadas as primeiras fotografias aéreas tiradas de um avião para mapeamento geológico, que foram utilizadas para construir um mosaico que cobria Bengasi, Líbia (Lillesand, T.M. [et al.], 2004e, p. 226).

As aeronaves não tripuladas surgiram logo após o advento do avião, aparecendo em torno da época da Primeira Guerra Mundial, em 1916 (Dalamagkidis, K., 2014, p. 58).

A fotografia aérea recebeu maior atenção no reconhecimento militar durante a Primeira Guerra Mundial (1914-1915), quando mais de um milhão de fotografias foram obtidas para

reconhecimento aéreo (Lillesand, T.M. [et al.], 2004d, p. 61). Este acontecimento marca o início de aquisição de fotografias aéreas de forma rotineira (Campbell, J.B. and Wynne, R.H., 2011, p. 8).

No período entre as duas Grandes Guerras, verificaram-se grandes desenvolvimentos desta tecnologia: as câmaras foram melhoradas e adaptadas para o uso em aviões, a fotogrametria foi aplicada à fotografia aérea e ainda houve um grande aproveitamento desta informação em diversas áreas para fins civis (topografia, geologia, agricultura (…) (Campbell, J.B. and Wynne, R.H., 2011, p. 9).

A fotogrametria é a ciência e a tecnologia de obtenção de medidas espaciais e de outros produtos derivados, geometricamente confiáveis a partir de fotografias (Lillesand, T.M. [et al.], 2004a, p. 126). Os procedimentos de análise fotogramétrica podem variar, desde a obtenção de distâncias aproximadas, áreas e elevações, através da utilização de fotografias aéreas impressas e conceitos geométricos simples, até à geração de MDS, ortofotos, dados geográficos temáticos e outros produtos derivados através da utilização de imagens digitais e técnicas de análise relativamente sofisticadas (2004a, p. 126).

O desenvolvimento da informática, tanto no *hardware* como também no *software*, permitiu o tratamento de maiores quantidades de dados de uma forma mais célere e eficiente. Nos últimos anos a fotogrametria clássica, baseada em soluções mecânicas e ótico-mecânicas tem vindo a dar lugar à fotogrametria digital (Aguilar, M.A. [et al.], 2005, p. 335). Desde o seu aparecimento que a fotogrametria digital aérea automática e de curto alcance (*close-range*) se tornou numa ferramenta amplamente utilizada na modelação topográfica tridimensional. A sua utilização criou novas aplicações que permitem que um maior número de elementos topográficos sejam medidos, e, ao mesmo tempo apresentou alternativas a custos reduzidos (Westoby, M.J. [et al.] (2012, p. 301); Fonstad, M.A. [et al.] (2013, 428); Remondino, F. [et al.] (2011, p. 25)).

Nas últimas duas décadas (1990 a 2010) ocorreu uma revolução na aquisição e disponibilidade de dados topográficos fundamentais para a investigação em Geomorfologia, quer na celeridade de aquisição de dados tridimensionais, quer na facilidade associada aos vários métodos que podem ser aplicados (Micheletti, N. [et al.], 2014). Inicialmente, estes desenvolvimentos focavam-se na construção de Modelos Digitais de Elevação ou de Terreno, através da utilização da fotogrametria e do sistema de posicionamento global diferencial (dGPS), o que o tornava o processo oneroso, pois eram necessários equipamentos e técnicos especializados (2014).

A fotogrametria digital está a mudar os processos rapidamente e constitui a base para a

maioria das operações fotogramétricas atuais. No entanto, os mesmos princípios geométricos básicos aplicados aos procedimentos da fotografia impressa (tradicional, analógica, *hardcopy*) são reproduzidos na fotografia eletrónica (digital, *softcopy*) (Lillesand, T.M. [et al.], 2004a, p. 126).

Recentemente, restrições como a correta manipulação das distorções geométricas associadas à aquisição de imagem foram ultrapassadas ou tornaram-se mais automatizadas pelo desenvolvimento dos métodos *Structure-from-Motion* (SfM) (Micheletti, N. [et al.], 2014). Os procedimentos de fotogrametria são usados, amplamente, para a produção de uma variedade de produtos de dados geográficos, tais como imagens precisas para obtenção de dados vetoriais (2004a, p. 127). Deste modo, nos últimos anos foram-se desenvolvendo adaptações inovadoras em sistemas de imagem para a investigação na Geomorfologia (Micheletti, N. [et al.], 2014). Com efeito, a deteção remota tem sido amplamente utilizada no domínio das Geociências, onde a análise e interpretação de fotografia aérea é um dos métodos mais comuns e tanto é empregue em estudos prévios (como a preparação de campanhas de campo), como em reconhecimentos de terreno (Pinho, R., 2009, p. 5).

## 2.2 Veículos Aéreos Não Tripulados

Apesar da sua recente invenção (1916) e proliferação, o primeiro mecanismo voador autónomo conhecido foi construído por Arquitas de Tarento (Sul de Itália) no ano de 425 a.C.. O filósofo produziu um pássaro mecânico, "o pombo", que voou cerca de 200 metros (Dalamagkidis, K., 2014, p. 58-59). Contudo, os modelos mais parecidos à atual definição de VANT foram desenvolvidos e implementados recentemente, no período da Guerra Fria (Valavanis, K.P. and Vachtsevanos, G.J., 2014, p. 1).

O VANT (ou UAV) em termos genéricos é uma aeronave, concebida para operar sem um piloto humano a bordo (Remondino, F. [et al.], 2011, p. 25), cujo voo é controlado autonomamente por computadores no veículo, ou através de controlo remoto de um piloto no solo ou noutro veículo (Duan, H. and Li, P., 2014, p. 1). Com efeito, estes veículos podem ser remotamente controlados, serem semiautónomos, autónomos, ou terem a combinação destas possibilidades (Eisenbeiß, H., 2009, p. 2). Esta técnica apresenta-se como uma tecnologia de aquisição de dados aerofotogramétricos (Eisenbeiß, H., 2009, Neto, M.S., 2014), uma vez que possibilita a obtenção de fotografias aéreas verticais, componentes planimétricos e altimétricos para a construção de mapas (Pina, M. [et al.], 2000, p. 80). Como todos os sistemas de deteção remota passivos, a captura de fotografias via VANT, depende de energia que é refletida e/ou

emitida a partir de características da superfície da terra (Lillesand, T.M. [et al.], 2004d, p. 58). Normalmente, a plataforma está equipada com um sistema de medição fotogramétrico que pode incluir câmaras de vídeo, térmicas ou de infravermelhos, LiDAR, ou uma combinação deles (Eisenbeiß, H., 2009, p. 3).

O termo VANT é comummente utilizado na Ciência dos Computadores, Robótica e Inteligência Artificial, assim como nas comunidades de Fotogrametria e Deteção Remota (Eisenbeiß, H., 2009, p. 2).

No XX Congresso da ISPRS (*The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*[1]) realizado em Istambul no ano de 2004, a Resolução I.1 diz respeito à temática dos VANTs. Nesta resolução, o Congresso nota que os VANTs: fornecem uma nova e controlada plataforma para a aquisição remota de dados; fornecem uma aquisição de dados remotos mais rapidamente e com menor custo do que de veículos aéreos pilotados; têm uma capacidade de manobra que permite aquisição de dados em ambientes perigosos para a vida humana e/ou inacessíveis diretamente (por exemplo, incêndios florestais, vulcões, derramamentos tóxicos, desastres de transportes, etc.).

Em condições de tempo nublado e chuvoso, a aquisição de dados com VANT ainda é possível se a distância ao objeto permitir voar abaixo das nuvens. Todavia estas plataformas estão muito dependentes das condições meteorológicas favoráveis, pois as suas manobras podem ser dificultadas pela velocidade do vento ou pela presença de nuvens (Eisenbeiß, H., 2009, p. 3, Westoby, M.J. [et al.], 2012, p. 301).

Os VANTs não são limitados pelas condições psicológicas e fisiológicas que afetam os pilotos e ainda têm a capacidade de aquisição de dados de forma rápida, podendo transmitir os dados recolhidos (imagem, vídeo e orientação) em tempo real para a estação de controlo de solo via telemetria (Eisenbeiß, H., 2009, p. 3). Se este tipo de transmissão não for possível, os dados podem ser recolhidos através de um rápido *download* da informação no final do voo (Jordan, B.R., 2015, p. 50).

Devido aos limites da distância de comunicação, os VANTs devem apenas voar na linha de observação (*line-of-sight*), e serem operados com um piloto de apoio (Eisenbeiß, H., 2009, p. 4). O alcance do voo, para além da linha de observação, está dependente das capacidades e da habilidade do piloto para detetar e seguir a orientação do VANT. De modo a maximizar as

[1] Consiste numa organização não-governamental dedicada ao desenvolvimento da cooperação internacional para o avanço da fotogrametria e deteção remota, e das suas aplicações. (http://www.isprs.org/society/Default.aspx)

potencialidades do voo, é necessário que o piloto seja bem treinado e por questões de segurança deve ser capaz de interagir com o VANT, em qualquer momento (Eisenbeiß, H., 2009, p. 4).

Com base na unidade de comunicação e de direção dos VANTs, pode afirmar-se que a distância do voo depende do intervalo (ou alcance) de ligação de rádio para o VANT. A ligação de rádio está dependente da situação local da área de interesse porque podem ocorrer interferências com outros sistemas (carros e aeronaves telecomandados, rádio ouvidos pelos cidadãos). Assim, a frequência para a comunicação entre GCS (*Ground Control Station* – Estação de Controlo) e o VANT tem que ser selecionada cuidadosamente (Eisenbeiß, H., 2009, p. 5).

Devido às características únicas dos voos dos VANTs (como voo em baixas altitudes), normalmente, as imagens são nítidas e oferecem imensas vantagens tais como: excelente resolução, grande sobreposição (o que possibilita a construção de nuvens de pontos 3D de resolução similar), e um tempo reduzido de execução (Humphrey, D., 2014). Ao contrário do *Google Earth* ou das fotografias aéreas convencionais, as imagens do VANT oferecem um elevado grau de pormenor a uma escala maior (Araújo, M.A. [et al.], 2014, p. 2203, Jordan, B.R., 2015, p. 50).

A maior parte dos VANTs disponíveis no mercado, baseiam-se em sistemas de baixo custo, o que corresponde a uma das maiores vantagens da sua utilização, uma vez que os VANTs têm custos operacionais mais baixos do que aeronaves tripuladas. No entanto, o custo pode ser similar ao dos veículos tripulados, o que varia em função da aplicação (Eisenbeiß, H., 2009, p. 5). Os VANTs não estão equipados com equipamentos de comunicação com as autoridades de controlo de tráfego aéreo, nem com sistemas que evitem colisões. Entre outros componentes, as plataformas VANT têm de integrar um recetor GNSS (GPS), unidades de estabilização e navegação (que permitem voos precisos, garantindo uma cobertura e uma sobreposição suficiente das fotografias (Eisenbeiß, H., 2009)), uma unidade de medição inercial (IMU – *inertial measurement unit*), sistema de medição ótico 3D, principalmente representado através de um ou vários *laser scanners* e câmaras (Neitzel, F. and Klonowski, J., 2011, p. 1).

Atualmente os VANT estão a ser desenvolvidos para serem usados em tudo, desde entregas de produtos, levantamentos para a agricultura e indústria, serviços de busca e salvamento de pessoas, publicidade, vídeo e fotografia de eventos, cartografia e estudo em várias áreas (geologia, biologia, arqueologia …) (Legarreta, P. and Pirola, A. (2015), Jordan, B.R. (2015)).

### 2.2.1. Segurança e Regulamentação

Apesar dos VANTs não estarem regulamentados em Portugal, existe a necessidade de ser criado um quadro legal para utilização destes veículos. De acordo com o Drone Club Portugal[2] enumeram-se (algumas) razões que suportam a ação legislativa neste domínio:

"*1) A perceção de que o desenvolvimento recente e em ritmo de aceleração da indústria relacionada com os sistemas de aeronaves remotamente pilotadas para fins civis é uma das prioridades europeias, o que se reflete nos programas de incentivo ao investimento no sector aeronáutico, nomeadamente no âmbito dos programas SESAR[3], Horizonte 2020[4] ou Cosme[5];*

*2) Objetivo europeu de iniciar a integração plena dos RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) no espaço aéreo não segregado a partir de 2016;*

*3) Interesse crescente nas aplicações comerciais dos RPAS até 150kg de payload;*

*4) Necessidade de se criar um clima de investimento estável e seguro para as atividades de RPAS, quer a nível industrial, quer a nível operacional, estimando-se que, nos próximos dez anos, este sector possa vir a representar 10% do valor do mercado da aviação, ou seja, 15 000 milhões de euros;*

*5) As preocupações crescentes com a segurança face a riscos de queda de aeronaves e riscos de colisão com outras aeronaves ou objetos, conexionadas com temas sensíveis como*

---

[2] As finalidades do Drone Clube Portugal são: a promoção dos Sistemas Aéreos Não Tripulados (SANT). A promoção das atividades industriais e profissionais relacionadas com VARP. (http://droneclub.pt/).

[3] De acordo com a Comissão Europeia o projeto SESAR (*Single European Sky ATM Research*) é o pilar tecnológico do Céu Único Europeu. Destina-se a melhorar o desempenho da gestão do tráfego aéreo (ATM, *Air Traffic Management*), através da modernização e harmonização dos sistemas ATM, com definição, desenvolvimento, validação e implantação de soluções tecnológicas e operacionais inovadoras. O projeto Céu Único Europeu foi lançado no final dos anos 90, com o objetivo de remover as fronteiras aéreas nacionais e tornar o espaço aéreo mais eficiente, competitivo e seguro e menos prejudicial para o ambiente. (http://ec.europa.eu/transport/modes/air/sesar/index_en.htm, acedido a 31 de junho de 2015).

[4] Nos termos do artigo 1º das Disposições Gerais do Regulamento (UE) N.º 1291/2013 do Parlamento Europeu e do Conselho de 11 de dezembro de 2013, Horizonte 2020 é *Programa-Quadro de Investigação e Inovação (2014-2020), que estabelece o quadro que rege o apoio da União a atividades de investigação e inovação, que reforça a base científica e tecnológica europeia e promove os benefícios para a sociedade, bem como uma melhor exploração do potencial económico e industrial das políticas de inovação, investigação e desenvolvimento tecnológico.*
*(*http://www.qren.pt/np4/np4/?newsId=4046&fileName=Horizonte2020.pdf acedido a 31 de junho de 2015).

[5] COSME é o programa da UE para a Competitividade de Pequenas e Médias Empresas (PME) que vigora entre 2014-2020. O COSME apoiará as PMEs com um melhor acesso ao financiamento e mercados, apoio aos empresários e condições mais favoráveis para a criação e crescimento de empresas (https://ec.europa.eu/easme/en/cosme acedido a 31 de junho de 2015).

*seguros de responsabilidade civil, privacidade e proteção de dados."*

Neste sentido, vários organismos internacionais e europeus têm trabalhado de modo a que a regulamentação seja elaborada e aplicada o mais celeremente possível.

A ICAO (*International Civil Aviation Organization*), sob os auspícios das Nações Unidas, produziu no ano de 2011, uma circular (Circ. 328 /AN190) específica sobre a regulação dos VANTs, na qual foram aprovadas diretrizes, exclusivamente, direcionadas para os *Unmanned Aircraft Systems* (UAS).

A Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu e ao Conselho, "Uma nova era para a aviação", (COM(2014) 207 final[6]), avançou com a integração dos VANTs no espaço aéreo e delegou à EASA (*European Aviation Safety Agency*) a tarefa de iniciar a elaboração de normas específicas a aplicar à escala da União Europeia (Miranda, M., 2014).

De acordo com uma notícia apresentada no Jornal de Notícias[7], no seguimento das instruções da Comissão Europeia, no dia 12 de março de 2015, a EASA enviou um documento, intitulado de "Conceito de Operações", aos estados-membros. Este documento "*prevê regras seguras e proporcionais para a integração*" dos VANTs no espaço aéreo europeu, salientando que a sua integração "*deve promover a competitiva indústria de drones, a criação de emprego e o crescimento das Pequenas e Médias Empresas*", e garantindo, simultaneamente, a "*adequada proteção de cidadãos e mercadorias*". Para além disso, sugere a criação de três categorias, considerando as várias operações e os tipos de *drone*, com os respetivos regimes regulatórios, que servirão de base para as normas de segurança a serem aplicadas na Europa. As categorias de operação são: "*Open*" (Aberta), "*Specific*" (Específica) e "*Certified*" (Certificada).

A primeira operação ("*Open*") engloba VANTs de pequena dimensão, que têm de ser visíveis num raio de 500 metros, não podem voar acima dos 150 metros de altitude e estão proibidos de sobrevoar áreas consideradas reservadas. Esta categoria pode ser "*supervisionada pela polícia*" e "*não necessita de autorização das autoridades da aviação*", somente é obrigada a cumprir um sistema de regulação de aviação mínimo, que diz respeito à distância a manter dos aeródromos, aeroportos e dos aglomerados populacionais (LUSA, 2015).

A categoria "*Specific*" envolve operações com um maior grau de complexidade e com riscos mais significativos tanto para pessoas como para a aviação, implicando por isso uma avaliação das autoridades aeronáuticas. A EASA frisa que os riscos serão analisados e mitigados

[6] http://ec.europa.eu/transport/modes/air/doc/com(2014)207_pt.pdf (acedido a 31 de junho de 2015)

[7] http://pt.noticias.voxquo.com/noticia-detalhe-media.asp?id=1618091&t=Europa-quer-separar-drones-em-categorias-e-legislar-a-utiliza%E7%E3o (acedido a 31 de junho de 2015)

em concordância com as autoridades aeronáuticas locais antes de cada operação, estando esta dependente de uma autorização (LUSA, 2015).

Na categoria das operações "*Certified"* inserem-se aviões não tripulados de longo alcance e controlados remotamente, por isso o risco das suas operações são considerados similares aos da aviação tripulada normal. Deste modo a EASA defende que estas operações e os *drones* utilizados tenham um tratamento igual ao dos voos comerciais, o que envolve a emissão obrigatória de vários certificados, assim como uma certificação específica para os VANTs (LUSA, 2015).

Existem países que já têm legislação em vigor, como: Reino Unido, Alemanha, Suécia e França (Miranda, M., 2014).

Na Suíça, o BAZL (*Bundesamt für Zivilluftfahrt* - Escritório Federal para Aviação Civil) é a autoridade federal responsável. Esta entidade categorizou os VANTs em duas classes de acordo com o seu peso de descolagem, inferior e superior a 30 kg. Os veículos com um peso superior a 30 kg precisam de ter uma autorização oficial dada pelo BAZL, enquanto para a segunda categoria (inferior a 30 kg) a autorização depende do tipo do VANT. Os serviços de navegação aérea responsáveis, como Skyguide (serviços suíços de navegação aérea), estão autorizados a definir exceções e a dar permissão para voos especiais. Além disso, antes de fazer um voo autónomo na Suíça são obrigatórios os seguintes documentos: a permissão do proprietário do terreno, e a confirmação de pedido da companhia de seguros (Eisenbeiß, H., 2009, p. 39).

A Autoridade de Aviação Civil (*Civil Aviation Authority* - CAA) do Reino Unido publicou um guia abrangente sobre operações de veículos aéreos não tripulados no seu espaço aéreo, no ano de 2004 (CAP, 2004). Este guia oferece, entre outros, uma boa visão geral das considerações legais, certificações, registos, manutenção e inspeção, segurança de voo, e operações relacionadas com os VANTs. O próprio guia faz a distinção entre recreio e uso comercial em quatro categorias de peso (<7 kg, 7-20 kg, 20-150 kg e <150 kg) (Eisenbeiß, H., 2009, p. 39).

No Canadá, os voos recreativos com VANTs disponíveis no mercado e com peso inferior a 35 kg não requerem qualquer tipo de licença ou treino especial. No entanto, as regras de segurança estabelecidas do voo, do modelo do veículo, e as normas devem ser respeitadas em todos os momentos e em todas as localidades. Nos voos com fins comerciais, o lucro ou recompensa exige um certificado especial de operação de voo, emitido pela entidade Transportes do Canadá (Ramsey, C.L. [et al.], 2014, p. 270).

Em Portugal a utilização destes veículos ainda não está regulamentada. No programa

Grande Entrevista da Antena 1[8], realizado a 20 de abril de 2015, Filipa Calvão (Presidente da Comissão Nacional de Proteção de Dados) considera que "*estes aparelhos invadiram o mercado. É uma nova tecnologia que coloca problemas novos, quer do ponto de vista de segurança nacional, quer do ponto de vista de garantia da integridade física de todos*."

No futuro, por questões de segurança, serão definidos regulamentos semelhantes aos apresentados a nível nacional e/ou europeu em todos os países (Eisenbeiß, H., 2009, p. 39).

### 2.2.2. UAV System

Apesar de não haver um piloto fisicamente presente na aeronave, isso não significa que o veículo voe sozinho, isto é, de forma completamente autónoma (Everaerts, J., 2008, p. 1187).

De acordo com Duan, H. and Li, P. (2014) o termo UAS (*Unmanned Aircraft System*) realça a integração do VANT com outros elementos necessários, de modo a constituir um sistema que seja capaz de efetuar uma missão específica.

Como é exposto na Figura 1 um típico UAVS civil é composto por cinco elementos: (1) VANT, (2) elemento humano, (3) carga (*payload*), (4) elementos de controlo, e (5) arquitetura de ligação de dados de comunicação (*data link communication*). O elemento mais relevante no sistema é o VANT, que pode ser um veículo de asa fixa ou rotativa. A aeronave é controlada a partir do solo através da GCS (*Ground Control Station*) que fornece as instalações para que seja efetuado o controlo humano. A designação ligação de dados (*data link*) é atribuída ao modo de como as informações de controlo são enviadas e recebidas da GCS para o VANT e vice-versa (se o voo for a altitudes superiores a 150-200 metros, geralmente é mantida a comunicação com o Controlo de Tráfego Aéreo, caso seja requerida). Na maioria dos casos ao realizar uma missão o VANT tem de levar carga a bordo, como por exemplos câmaras para efetuar deteção remota (Duan, H. and Li, P., 2014, p. 5, Everaerts, J., 2008, p. 1187), os componentes eletrónicos que o fazem funcionar, assim como as baterias.

A descolagem e a aterragem do VANT são consideradas os procedimentos mais trabalhosos da operação, onde o elemento humano é essencial. Com o desenvolvimento da tecnologia, este fator poderá ser substituído por sistemas mais complexos com um elevado grau de autonomia, o que significa que o elemento humano tem tendência a ficar mais reduzido à medida que capacidade tecnológica vai aumentado (Duan, H. and Li, P., 2014, p. 5).

[8] http://www.asjp.pt/2015/04/20/comissao-entende-que-a-lista-vip-viola-o-principio-da-igualdade/

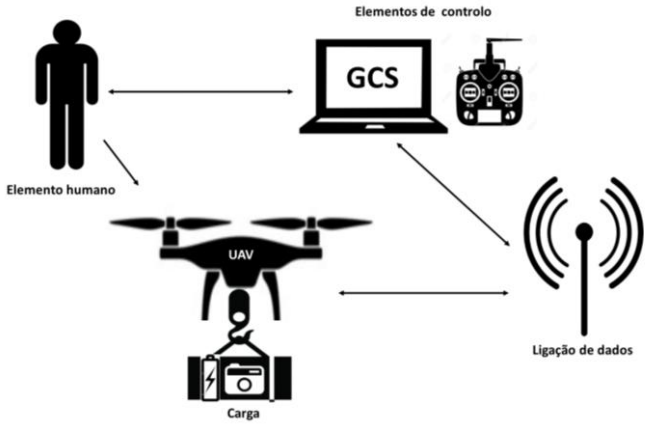



*Figura 1. Sistema VANT.*

## 2.3. Costas rochosas

As costas rochosas são definidas como costas em arriba compostas por material consolidado independentemente da sua resistência (Sunamura, T., 1992b, p. 2). Naylor, L.A. [et al.] (2010), referem que as costas rochosas são predominantemente formas de erosão (*erosional landforms)*, enquanto que as costas arenosas (*soft coast*) são caraterizadas principalmente por terem uma natureza deposicional, com sedimentos pouco ou nada consolidados.

Segundo Emery & Kuhn (1982), as costas rochosas ocupam cerca de 80% do litoral mundial. Na costa continental europeia, as costas rochosas representam cerca de 1/3, i.e. cerca de 3666km (Gómez-Pujol, L. [et al.], 2014, 77). Segundo os mesmos autores, 48% das costas rochosas desenvolvem-se em afloramentos de rochas resistentes, tais como granitos e calcários.

Os fatores a considerar no estudo das costas rochosas são essencialmente dois, a energia das ondas e o tipo de rocha (Sunamura, T., 1992b, p. 2). A intensidade da onda é bastante influenciada pelo volume dos sedimentos que estão sobrepostos ao substrato rochoso (Sunamura, T., 1992b, p. 3). Por sua vez o balanço sedimentar numa costa rochosas depende: do fornecimento de sedimentos de e para a plataforma continental, da deriva litoral, dos sedimentos trazidos pelos rios e dos materiais resultantes da erosão das arribas. Se a soma das taxas de afluência dos sedimentos é menor que a soma das taxas de escoamento, o volume de sedimentos diminuí. Caso contrário, quando as taxas de afluência são superiores às taxas de escoamento, ocorre uma acumulação de sedimentos. Contudo estruturas artificiais ou atividades humanas implementadas nos compartimentos rochosas, afetam o balanço sedimentar (Sunamura, T., 1992b, p. 3).

A existência de grandes quantidades de sedimentos sobre o substrato rochoso pode contribuir para a proteção dos ataques das ondas (funcionando como uma camada protetora, e

nestas condições considera-se que existe uma praia mesmo que exista uma arriba atrás). Por outro lado os sedimentos existentes podem acentuar o desgaste do substrato atuando como abrasivo. São estes dois efeitos contrastantes que caraterizam os processos costeiros nas costas rochosas (Sunamura, T., 1992b, p. 3).

Os processos erosivos nas costas rochosas são considerados irreversíveis uma vez que as rochas que as constituem não se conseguem reconstruir (Sunamura, T., 1992b, p. 2). De acordo com o "*Coastal Vulnerability Index"* (CVI) de Pethick, J.S. and Crooks, S. (2000), a vulnerabilidade das formações costeiras pode ser caracterizada por tempos de relaxamento (o tempo necessário para a costa recuperar a sua forma) e intervalos de retorno (frequência de eventos de tempestades extremas). As praias são definidas como ambiente altamente vulnerável, mas são capazes de responder numa questão de horas ao ataque das ondas causado por uma situação de "*storm-surge*", apresentando-se assim como um ambiente adaptável às mudanças (Pethick, J.S. and Crooks, S., 2000, p. 364). O mesmo evento que promove mudanças na praia, pode não ser suficientemente energético para causar impacto numa costa rochosa resistente. Mas, por outro lado, enquanto as praias, recuperam rapidamente, as costas rochosas quando afetadas não podem recuperar, o que implica que as mudanças sejam permanentes (Naylor, L.A. [et al.], 2010, 3).

A costa é constantemente erodida pelas ondas (Pavlopoulos, K. [et al.], 2009, p. 70). Existem três tipos de ondas que podem ocorrer na base da arriba, quando chegam paralelamente à costa: ondas estacionárias, ondas a quebrar e ondas já quebradas (Sunamura, T., 1992c, p. 29). A ocorrência destes tipos de onda depende da profundidade requerida para a onda quebrar, e da profundidade da água na base da arriba. Caso a profundidade na base arriba for superior à profundidade a que um tipo de onda específico possa quebrar, formam-se ondas estacionárias. Se a profundidade for idêntica a esse valor, a onda rebenta sobre a arriba. Por último, se a profundidade for inferior, a onda rebenta mais para o largo e já chega rebentada à arriba (ondas quebradas) (Sunamura, T., 1992c, p. 29).

As ondas estacionárias caracterizam-se por exercerem pouca pressão na arriba. A pressão exercida pelas ondas a quebrar é mais intensa, uma vez que a onda ao quebrar origina um grande pico de pressão na base da arriba. Quando as ondas quebradas atingem a arriba, produzem um pequeno pico de pressão (Sunamura, T., 1992c, p. 30). O máximo da pressão dinâmica originada por ondas a quebrar, provavelmente, situa-se ligeiramente acima do nível da água parada (SWL – s*till water level*), verificando-se uma forte diminuição acima e abaixo desse nível (Sunamura, T., 1992c, p. 33; Trenhaile, A.S., 2006, p.815).

Quando as ondas escavam a base da arriba, esta acaba por se tornar instável devido ao aumento de declive e à instabilidade provocada pelo sub-escavamento. Esta instabilidade produz movimentos de vários tipos, como quedas de blocos, deslizamentos e fluxos detríticos. A ocorrência destes movimentos é influenciado pela litologia, estrutura geológica e propriedades geotécnicas do material de formação da arriba, bem como da magnitude da erosão basal. Os materiais fornecidos pelos movimentos de massa acumulam-se na base da arriba, protegendo-a, do ataque das ondas (Sunamura, T., 1992d, p. 75)

A força das ondas é caraterizada pelas suas ações hidráulica e mecânica, que consiste principalmente na compressão, tensão e fracturação ("*shearing"*). Quando as ondas batem na base da arriba uma força compressiva atua perpendicularmente à costa. Se a arriba estiver fraturada, o ar que existe nos interstícios da rocha é rapidamente comprimido. Quando a onda recua dá-se um processo de descompressão. Deste modo os interstícios da arriba são alargados e fragmentos de material são facilmente removidos da arriba, num processo denominado por *quarrying* ou *plucking* (Sunamura, T., 1992d, p. 78). A força das ondas enriquecida com os detritos que elas transportam, exercem uma pressão mecânica que engloba a abrasão e a força de impacto produzida na arriba pela mobilidade das partículas (Sunamura, T., 1992d, p. 78).

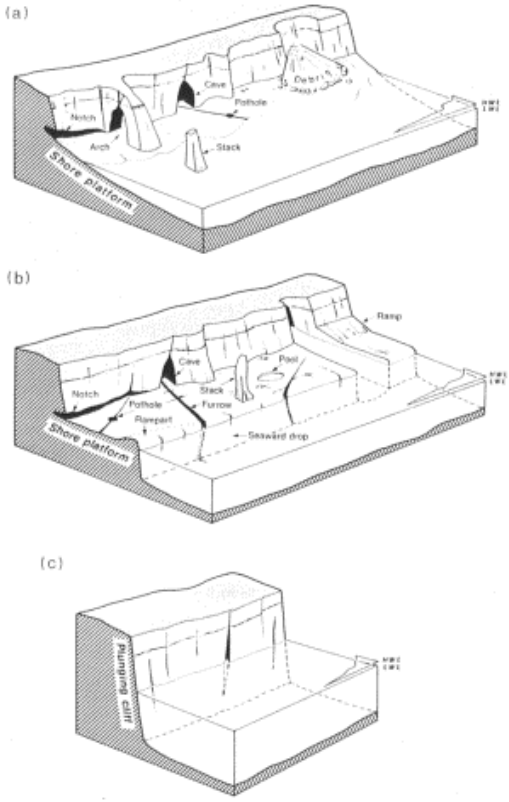



*Figura 2. Perfis longitudinais das plataformas Tipo-A / B, e arriba mergulhante. Fonte: (Sunamura, T., 1992e, p. 140)*

Deste modo o trabalho da erosão marinha manifesta-se através do recuo das arribas e da consequente formação de plataformas de erosão marinha (*shore platform*).

Segundo Sunamura (1992) existem três tipos de plataforma de erosão marinha associada às costas rochosas:

- Plataforma inclinada (tipo a) que consiste numa plataforma levemente inclinada, sem quebras topográficas significativas;
- Plataforma horizontal (tipo b) que apresenta uma quebra significativa no seu desenvolvimento em direção ao mar;
- Arriba mergulhante (tipo c) que é formada por uma arriba abrupta, que se prolonga em

profundidade para além do nível médio da água do mar, em que não existe plataforma de erosão marinha associada às condições presentes do nível do mar.

Existem muitas variações nas costas rochosas que resultam de fatores litológicos, das estruturas geológicas (estratificação, fraturas e falhas), dos tipos de meteorização das rochas, da amplitude das marés, do grau de exposição à ondulação bem como de herança de oscilações do nível médio do mar (Sunamura, T., 1992e, p. 139).

O recuo da arriba é essencial para a formação das plataformas do tipo A e tipo B. A erosão da arriba pode ser determinada pela magnitude da força de ataque das ondas (*Fw*), relativamente à força de resistência das rochas (*Fr*). Esta última força é muito influenciada pela meteorização e efeitos de fadiga, mas também por fatores biológicos. A maré assume um papel relevante, uma vez que o nível do mar determina a elevação da ação da onda e controla o tipo de onda que chega à arriba, e ainda porque a amplitude da maré pode influenciar a meteorização e as atividade biológicas (Sunamura, T., 1992e, p. 141).

Sob as condições contemporâneas de marés e de ondas, se a força de resistência das rochas for maior que força de ataque das ondas assume-se que se reúnem as condições dinâmicas para a ocorrências de arribas mergulhantes. Caso contrário (se força de ataque das ondas for superior à força de resistência das rochas) desenvolvem-se as plataformas (Sunamura, T., 1992e, p. 145). As plataformas Tipo A desenvolvem-se quando a força de ataque das ondas é capaz de degradar a superfície da plataforma, ou seja a força de ataque das ondas é maior que força de resistência das rochas.

Nas costas rochosas formam-se sapas e fissuras que podem ser alargadas pela energia das ondas, dando origem a grutas (Pavlopoulos, K. [et al.], 2009, p. 71). Outras formas de relevo presentes nas costas rochosas são: arcos (originados pelo ataque das ondas em ambos os lados de um promontório) pináculos (ou penhascos, que podem resultar da destruição dos arcos, como também da intrusão de diques de rochas mais resistentes em materiais mais brandos), marmitas (formas cilíndricas escavadas por ação de materiais abrasivos), tafoni e alveólos (caracterizados pela existência de depressões na superfície das rochas que são devidas a desagregação mecânica e não são exclusivos dos ambientes litorais) (Sunamura, T. (1992f), (Araújo, M.A.).

Os litorais dominados por movimentações tectónicas apresentam elementos como falhas, dobras e fraturas. Estes elementos podem ser originados pelo *stress* mecânico das rochas durante atividade tectónica, ou ainda pela libertação da pressão de confinamento associada à meteorização física (Scheffers, A.M. [et al.], 2012, p. 66). Geralmente as fraturas conduzem a meteorização no

seio das formações geológicas, uma vez que constituem canais que podem ser percorridos tanto pela água (do mar ou da chuva) como pelo ar, o que pode afetar profundamente a rocha, acelerando o seu desgaste e enfraquecimento interno. As costas dominadas pela fracturação apresentam-se frequentemente com um padrão cruzado de lineamentos em linha reta (Scheffers, A.M. [et al.], 2012, p. 66).

É precisamente este padrão que se observa nos dois morros essencialmente graníticos que caracterizam a área de estudo, distinguindo-a do litoral da região do Porto que é, no geral baixo, embora quase sempre, semeado por rochedos (Araújo, M.A. [et al.] (2014), Carríngton da Costa, J. and Teixeira, C. (1957)).

## 2.4. Estado da arte

Apesar da relevância em termos quantitativos, este tipo de costa tende a receber menos atenção por parte da comunidade científica, quando comparado com as praias que apresentam um maior uso urbano, industrial ou recreativo (Sunamura, T., 1992a, 2) e que representam um elevado valor social e económico (Naylor, L.A. [et al.], 2010, 3). Segundo uma análise de Naylor, L.A. [et al.] (2010) realizada a dezanove livros sobre Geomorfologia costeira, com o intuito de perceber quanta atenção é dedicada ao estudo das costas rochosas, concluía-se que, com a exceção de duas obras, as restantes dezassete dedicavam apenas um capítulo ou menos às costas rochosas, e apenas seis tinham 10% do seu conteúdo dedicado ao assunto. Todavia, é de salientar que nos últimos anos, tem havido um interesse crescente na Geomorfologia das costas rochosas. Tal facto reflete-se no número de publicações científicas, e também no número de investigadores que delas se ocupam (Naylor, L.A. [et al.], 2010, 3).

De forma a corroborar a análise de Naylor, L.A. [et al.] (2010), foi elaborada uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de verificar o número de artigos publicados sobre costas rochosas em relação às publicações sobre praias. Os artigos foram pesquisados no sítio da internet "*Web of Science"* no dia 3 de agosto de 2015, pelas palavras "*beach"* e "*rock coast"* (que inclui "s*hore platform*" e "*rock cliff*") presentes no seu título, em intervalos de cinco anos. Após o resultado inicial, a busca foi refinada para as áreas de pesquisa "Geologia" e "Geografia Física" (isto com o intuito de reunir o máximo de artigos de interesse geomorfológico).

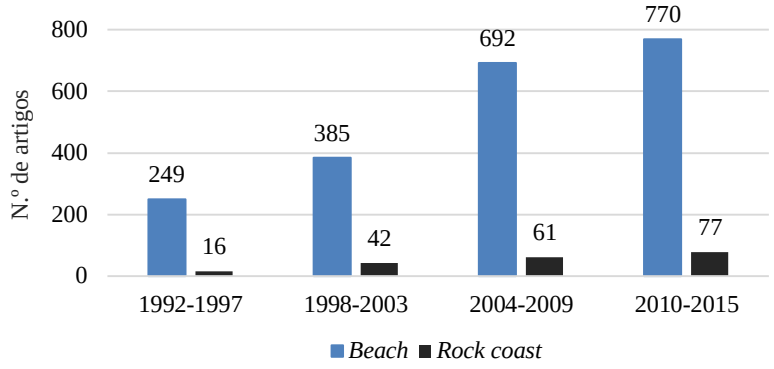



*Figura 3. Pesquisa bibliográfica incidente nas temáticas de praias (costas arenosas) e costas rochosas no Web of Science (3/8/2015). Fonte: Elaboração própria (adaptado de Naylor, L. A. et al. 2010 ).*

Observando a Figura 3 verifica-se que o número de publicações referentes às praias é muito superior ao das costas rochosas. Nota-se um aumento generalizado e significativo ao longo dos anos o que reflete a importância do estudo do litoral, contudo e de acordo com a observação anterior o aumento é muito mais acentuado no caso das praias. Como esta pesquisa apenas comtempla a presença de palavras específicas no título, os resultados podem estar enviesados, ou seja, podem existir mais ou menos artigos que abordem a temática mas que, por algum motivo, as palavras referidas não se encontrem no título.

Com o objetivo de colmatar essa lacuna foi feita uma nova pesquisa com as palavras "*rock coast*" em duas revistas científicas, *Geomorphology* e *Marine Geology*¸ para os anos de 2015 e 2014. A busca dos artigos em ambos os periódicos foi efetuada no sítio da internet "*Science Direct*", nas respetivas páginas[9], nos dias 5, 6 e 12 de agosto. As palavras-chave continuaram a ser "*rock coast*", mas a pesquisa foi alargada a todos os campos (não ficando restrita somente ao título como no caso anterior). Na *Geomorphology* foram apresentados 203 resultados (110 em 2015 e 93 em 2014), na revista *Marine Geology* foram encontrados 103 artigos (59 para 2015 e 44 para 2014). Com o objetivo de verificar se o artigo incidia sobre o tema em estudo, foi lido o resumo do artigo. Caso o tema se enquadrasse, procedia-se a uma breve leitura do mesmo, assim como eram realizadas buscas por palavras-chaves como: "*rock coast*", "*Sunamura*", "*Trenhaile*" de modo a obter uma confirmação. Para além disso, em casos que não eram suficientemente claros, foi feita uma pesquisa sobre a área de estudo (no "*Google Earth*" ou em imagens no "*Google*"). Depois de analisados, na revista *Geomorpholgy* existiam 23 artigos que falavam sobre costas

[9] Geomorphology: http://www.sciencedirect.com/science/journal/0169555X; Marine Geology: http://www.sciencedirect.com/science/journal/00253227

rochosas, na segunda revista apenas 7 artigos (nesta amostra foram incluídos dois artigos, um em cada revista, sobre "*beachrock*").

Após ter sido efetuado esta pesquisa era importante conhecer dois aspetos (1) de que é tratavam os artigos, e (2) que metodologias eram adotadas. Deste modo todos os artigos selecionados foram analisados. A informação recolhida foi armazenada num ficheiro *excel*, onde constam número e título do artigo, autores do artigo, ano de publicação, palavras-chave e tema (cf. Quadro 2 e Quadro 4). A realização do segundo quadro, referente às metodologias, para além do número do artigo e do tema, incorpora as classes correspondentes ao agrupamento de vários materiais e métodos. Este quadro envolveu a realização de um resumo dos materiais e métodos abordados (Descrição), e o preenchimento dos campos correspondentes às classes definidas dos materiais e instrumentos utilizados (cf. Quadro 3 e Quadro 5).

Por questões de simplicidade tanto os temas como os materiais e métodos utilizados foram agrupados em classes. No caso dos temas, foram agrupados em três grupos:

1. Geomorfologia que trata a caracterização ou classificação de formas de relevo, análise das dinâmicas de áreas costeiras (evolução da linha de costa) e movimentos de vertentes;
2. Tectónica que analisa questões relacionadas com subsidência ou soerguimento de estruturas;
3. Erosão que representa o estudo de bioerosão e erosão costeira.

Conforme se observa na Figura 4 na revista *Geomorphology* dos 23 artigos selecionados 10 estão inseridos no primeiro grupo, 4 em Tectónica e por último 9 artigos no grupo da Erosão. Por sua vez, na *Marine Geology* 3 artigos estão incluídos no grupo de Geomorfologia e os restantes 4 no terceiro e último grupo (Erosão).

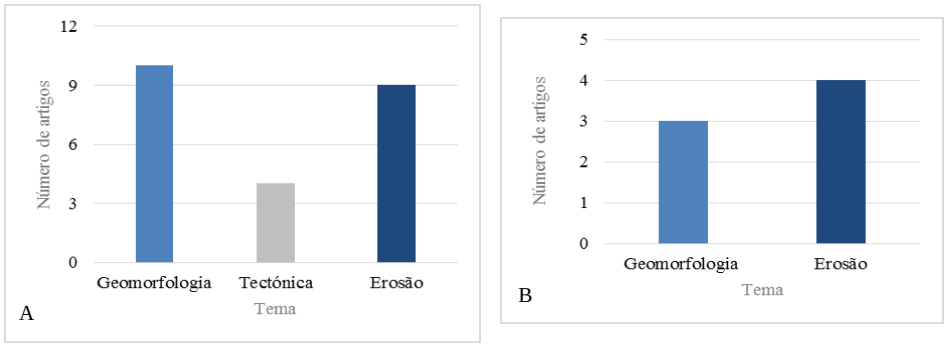



*Figura 4. Temas abordados nas revistas, A. Geomorphology; B. Marine Geology.*

Os materiais e métodos utilizados nos artigos foram agrupados em seis classes.

1. Recolha de dados que pode implicar a ida ao terreno onde são coletadas amostras ou dados (p. ex. por observação direta) ou a outros locais propensos à recolha de dados ou registos (meteorológicos, oceanográficos, etc.) em bibliotecas, arquivos, estudos anteriores, ou até mesmo bases de dados *online*;

2. Tratamento/Análise de dados representa o tratamento/processamento das amostras ou dados coletados (onde estão inseridos a limpeza e análises de composição, textura, volume, tamanho do grão das amostras, etc. ou leitura e seleção de dados pertinentes para a integração no estudo), assim como as suas análises (o que poderá implicar a aplicação de cálculos matemáticos, p. ex. análises estatísticas);

3. Levantamentos de GPS, LiDAR e Estação Total (L1, L2 e L3) respetivamente como o nome sugere, refere-se a levantamentos de dados com o apoio dos instrumentos supracitados, apesar dos levantamentos constituírem por si só uma forma de recolha de dados, optou-se por uma separação deste grupo para uma melhor perceção do instrumento utilizado;

4. SIG implica a entrada dos dados em ambiente SIG para processamento/análise de informação (p. ex. criação DEM, georreferenciação e medição de elementos) e elaboração de cartografia (os artigos devem possuir mais que um mapa de localização);
5. Perfis esquemáticos consistem no desenho de perfis longitudinais para representações estratigráficas ou de relevo;

6. Modelos numéricos englobam a proposta de novos modelos, a revisão ou reinterpretação de modelos anteriores.

Cada artigo pode estar inserido em uma ou mais classes.

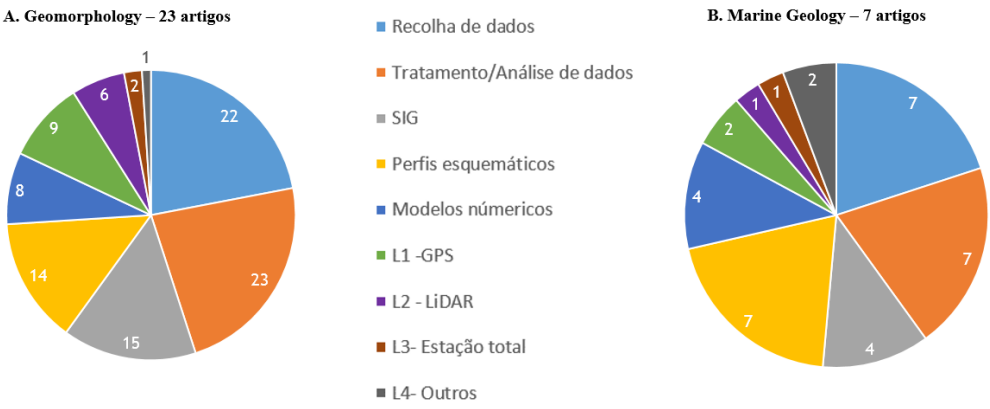



*Figura 5. Representação das classes dos materiais e métodos utilizados: A. revista Geomorphology; B. Marine Geology.*

Observando a Figura 5, em relação à revista *Geomorphology*, é possível verificar que a análise de dados é uma prática essencial nos estudos de Geomorfologia, visto que todos os artigos a praticam. Contudo para haver dados para analisar, é necessário que primeiramente exista uma recolha de dados, assim esta categoria assume um papel de relevo nos materiais e métodos utilizados (22 em 23 artigos). Os levantamentos também se apresentam como práticas frequentes, uma vez que no seu conjunto são utilizados em 18 artigos, contudo o instrumento mais requerido é o GPS (9), na situação oposta encontra-se o VANT (sendo apenas utilizado por Pérez-Alberti, A. and Trenhaile, A.S. (2015)). A diferença de um artigo do grupo análise de dados para a recolha de dados prende-se com o facto de esse artigo processar/analisar dados apenas em ambiente SIG, por utilizar as técnicas de levantamentos (nomeadamente LiDAR). Os SIGs têm uma grande popularidade, pois mais de metade dos artigos (15) utilizam esta ferramenta, reconhecendo-se a importância da cartografia. A representação gráfica sob a forma de perfis esquemáticos é igualmente bastante empregue, sendo que constam em 14 num total de 23 artigos. Os modelos numéricos são usados em menor quantidade (8 artigos) quando comparados com outros métodos, contudo vale a pena salientar que os modelos são usados mais frequentemente nos temas relacionados com a erosão (onde o objetivo passa por perceber e calcular taxas de recuo, modalidades de erosão, …).

Por sua vez na revista *Marine Geology*, observando a Figura 5, verifica-se igualmente que a recolha, tratamento/análise de dados e a elaboração de perfis esquemáticos apresentam-se como métodos fundamentais, encontrando-se a sua prática em todos os artigos. Nos artigos analisados mais de metade (4) utilizam modelos numéricos, sendo que três os aplicam ao estudo de processos

de erosão (seguindo a tendência observada na revista anteriormente analisada). A mesma importância é assumida pelos SIG, igualmente, utilizados em 4 artigos. Comparativamente à análise dos artigos da revista *Geomorphlogy*, os levantamentos com GPS, LiDAR e estação total não são utilizados tão frequentemente. Em compensação são usados outros instrumentos (L4 - Outros), tais como GPR (sigla inglesa para "*Ground Penetrating Radar"*, Radar de Penetração no Solo) e ecossonda.

A capacidade para identificar o efeito dos processos nas costas rochosas tem sido melhorada através da aplicação de técnicas como datação (geo)cronométrica e modelação física e matemática. No entanto, persiste algum desconhecimento no que toca à sua natureza precisa (Trenhaile, A.S., 2006, p. 815). Aliado a este facto, encontra-se também a dificuldade de obter dados quantitativos devido às mudanças quase impercetíveis que os litorais rochosos experimentam na escala temporal de uma vida humana (Trenhaile, A.S., 2006, p. 815).

## 2.5. Caraterização da área de estudo

### 2.5.1. Geografia

O nome do concelho de Vila do Conde deve-se, como o nome sugere, a um conde que vivia na Azurara e que não tinha herdeiros. Numa viagem de regresso depois de uma extensa peregrinação, o conde que vinha muito doente fez o voto de largar uma pomba branca e no local que ela pousasse, fundaria um convento e uma povoação a que daria o seu nome. A pomba voou e pousou no Alto de São João onde o conde ordenou a construção do mosteiro e em redor dele a povoação. O mosteiro e a povoação ainda lá estão presentes, e apresentam o nome do seu fundador: Conde, Vila do Conde (Fonseca, J., 2006, p. 226).

O município de Vila do Conde integra o distrito do Porto. Possui uma área de 149km$^2$, e os seus 79 533[10] habitantes encontram-se distribuídos pelas suas vinte e uma freguesias (Árvore, Aveleda, Azurara, Fajozes, Gião, Guilhabreu, Junqueira, Labruge, Macieira da Maia, Mindelo, Modivas, Vila Chã, Vila do Conde, Vilar de Pinheiro, União das freguesias de Bagunte, Ferreiró, Outeiro Maior e Parada, União das freguesias de Fornelo e Vairão, União das freguesias de Malta e Canidelo, União das freguesias de Retorta e Tougues, União das freguesias de Rio Mau e Arcos, União das freguesias de Touguinha e Touguinhó, e União das freguesias de Vilar e Mosteiró).

[10] Instituto Nacional de Estatística (INE, Censos 2011) - Indicador: População residente (N.º) por Local de residência, Sexo e Grupo etário; Decenal.

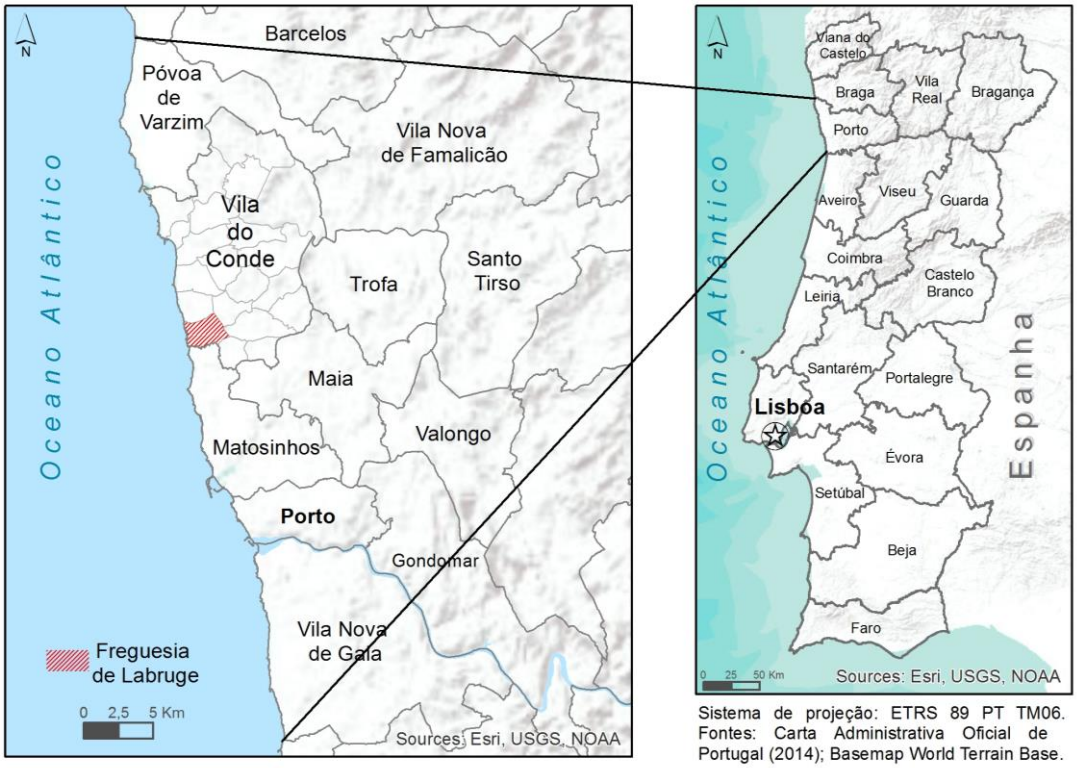



*Figura 6. Localização do concelho de Vila do Conde e da freguesia de Labruge, no distrito do Porto.*

"*O litoral sul do concelho possui um variado conjunto de valores de ordem biológica e paisagística, sendo de destacar a existência de um interessante e original mosaico de habitats, desde cordões dunares, rochedos, zonas húmidas, bouças e áreas agrícolas, desenvolvendo -se ao longo de uma linha de costa com 8,5 km de extensão. Persistem aqui paisagens seminaturais e humanizadas, de interesse local e regional, resultantes da interação do homem e da natureza"* (Aviso n.º 17821/2009, Regulamento Metropolitano da Paisagem Protegida Regional do Litoral de Vila do Conde e Reserva Ornitológica de Mindelo, 2009).

A área de estudo, a praia do S. Paio, situa-se no lugar da Mota, na freguesia de Labruge (extremo sudoeste do município), a 15km a norte do rio Douro. Labruge é uma freguesia litoral, e as suas freguesias vizinhas são: a norte, Vila Chã, a nordeste Modivas, a este União das freguesias de Vilar e Mosteiró e a sudeste Aveleda. Como é uma freguesia limítrofe do concelho, a sul é limita pelo rio Onda que faz fronteira também com a União das freguesias de Perafita, Lavra e Santa Cruz do Bispo pertencente ao município de Matosinhos.

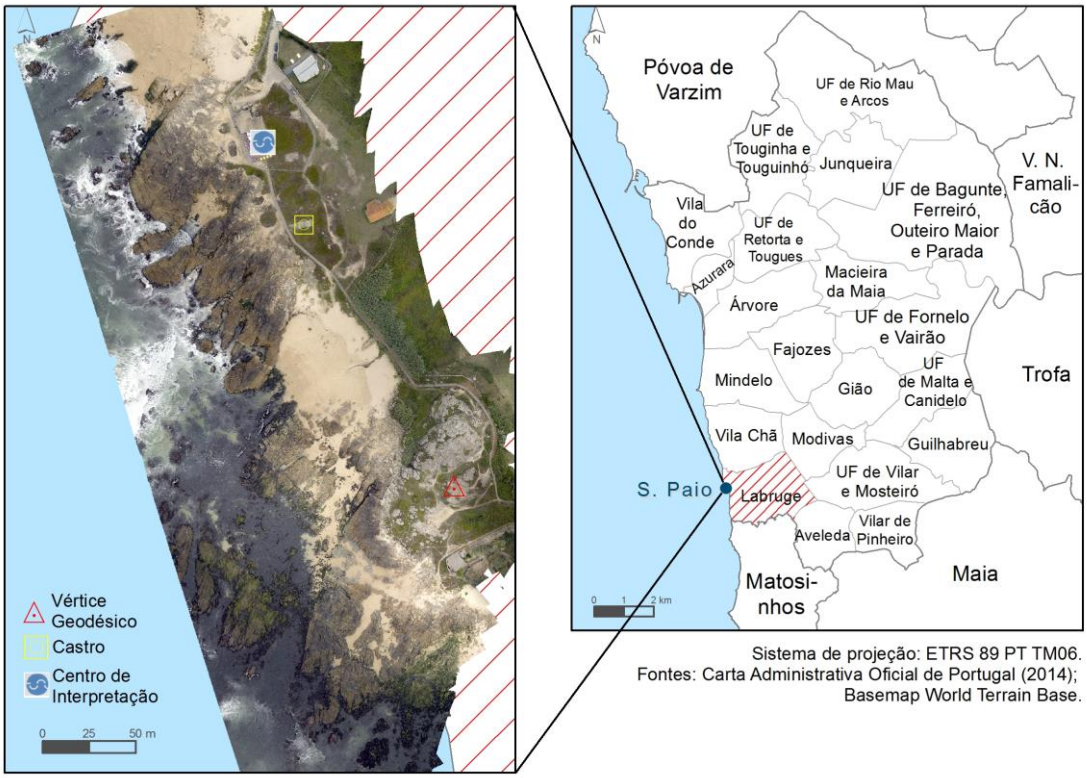



*Figura 7. Localização da área de estudo, S. Paio, no concelho de Vila do Conde.*

De acordo com dados do INE (Censos de 2011[11]) existem 2 806 pessoas a residiram em Labruge, com uma área de 5,1km$^2$ a densidade populacional é de 553,5 habitantes por quilómetros quadrado. Do total de 1270 pessoas empregadas[12], cerca 800 (63%) exercem funções no sector terciário, 404 habitantes (32%) têm profissões inseridos no sector secundário, e por último 63 (5%) trabalham no sector primário.

Apesar da pouca relevância em termos quantitativos ao nível da freguesia, a ruralidade (e o setor primário) está muito presente na área de S. Paio apresentada pelos campos de cultivo e floresta, diferenciando-se da generalidade do litoral português marcado por uma forte pressão urbanística (Almeida, P.B. [et al.], 2012).

Atualmente, a área do S. Paio constitui parte da Paisagem Protegida Regional do Litoral de Vila do Conde e da Reserva Ornitológica de Mindelo. Esta área foi criada por deliberação da Área Metropolitana do Porto, pelo Aviso n.º 17821/2009, de 12 de outubro, DR 2.ª série, e classificada

[11] Instituto Nacional de Estatística (INE, Censos 2011) - Indicador: População residente (N.º) por Local de residência, Sexo e Grupo etário; Decenal.

[12] Instituto Nacional de Estatística (INE) - Indicador: População empregada (N.º) por Local de residência (à data dos Censos 2011), Sexo, Sector de atividade económica e Situação na profissão; Decenal

como área protegida de âmbito regional nos termos do n.º 2 do artigo 15.º do Decreto -Lei n.º 142/2008, de 24 de Julho.

A área de S. Paio diferencia-se do litoral da região do Porto, pois consiste num trecho rochoso costeiro caraterizado por dois afloramentos, essencialmente graníticos, separados por uma pequena praia (a praia dos Castros) (Araújo, M.A. [et al.], 2014, p. 2200).

*Figura 8. A e B Praia dos Castros, vista do vértice geodésico (para norte -A), do passadiço para sul (B); C Castro de S. Paio (fonte:http://castrosgalaicos.blogspot.pt/2008/03/castro-de-s-paio-vila-do-conde.html); D Vértice geodésico; F Sinalização do Centro Interpretativo do S. Paio e da Área Protegida Regional do Litoral de Vila do Conde e da Reserva Ornitológica de Mindelo.*

### 2.5.2. Arqueologia

O Castro de S. Paio é o único castro marítimo Proto-histórico (fase final da Pré-história que coincide com a Cultura Castreja) conhecido no país (Almeida, P.B., 2012). Foi descoberto no final dos anos 50 do século XX pelo Arquiteto Fernando Lanhas que identificou cerâmicas antigas, estruturas habitacionais à superfície e gravuras espalhadas pela penedia (Almeida, P.B., 2012).

Durante os anos de 1993 a 1996 realizaram-se várias campanhas de escavação arqueológica, a partir das quais foi possível identificar um povoado com duas fases ocupacionais diferentes,

mas temporalmente sequenciais. A povoação mais antiga terá ocupado o local entre do século VI a.C. e meados do século II a.C. (Almeida, P.B., 2012). Quanto a ocupação mais recente sabe-se que esta findou durante o século I a.C., pressupondo-se que o local tenha sido abandonado antes ou durante o início da ocupação romana deste território (Almeida, P.B., 2012).

Na povoação mais antiga, as construções possuíam uma forma cilíndrica, alternando a sua construção entre a pedra e a madeira, ou outros materiais perecíveis (Almeida, P.B., 2012). Na ocupação mais recente as construções passaram a ser efetuadas exclusivamente com pedra mantendo a forma cilíndrica, tendo em alguns casos sido acrescentando um vestíbulo. Os telhados conservaram a sua forma cónica, pois a utilização de materiais orgânicos, como o colmo, manteve-se. (Almeida, P.B., 2012).

Na área de S. Paio foram descobertas peças que estarão relacionadas com atividades pré-históricas. Na fase mais antiga as cerâmicas eram elaboradas manualmente, com recurso a argilas misturadas com desengordurantes muito grosseiros. Mais tarde (entre meados do século II a.C. e a segunda metade do século I a.C.) a cerâmica passou a ser feita à roda, as pastas foram melhoradas, as peças adquirem novas formas e passam a integrar decoração estampilhada (realizada com carimbo) (Almeida, P.B., 2012).

Foram encontrados vários pesos de rede, o que prova que o mar constituía uma fonte de alimento. Associada à alimentação foram, também, encontradas mós utilizadas para a produção de farinha (Almeida, P.B., 2012).

Na Pré-história, a economia de subsistência era crucial na sobrevivência dos povos, assim, a produção de fio era fundamental para a confeção de roupas. Para além disso acredita-se que o fio tenha sido utilizado para a elaboração de redes de pesca (Almeida, P.B., 2012).

Foram igualmente identificadas gravuras, umas poderão ser produto da atividade quotidiana de quem ali viveu, outras poderão ter um significado simbólico da passagem de um povo. Na área de estudo existem penedos amoladoiros, formas naviformes que ao toque se apresentam polidas, supondo-se que foram criadas durante o processo de afiar instrumentos (Almeida, P.B., 2012).

### 2.5.3. Geologia e Geomorfologia

A península Ibérica é composta por quatro unidades morfoestruturais: bacias cenozóicas, orlas meso-cenozóicas, cadeias alpinas e o soco varisco ou hercínico (Ribeiro, A., 2013, 8).

A área de S. Paio encontra-se na unidade morfoestrutural do soco hercínico (ou Maciço Hespérico, Antigo ou Ibérico) que representa dois terços da área de Portugal Continental. Esta estrutura corresponde a um conjunto constituído por rochas sedimentares, ígneas e metamórficas de idade anterior ao Mesozoico (Pré-câmbrico e, especialmente, Paleozóico) que afloram na metade ocidental da península Ibérica, e que foram consolidadas principalmente com os movimentos hercínicos (Hevia, I.M., 2004, p. 164). Em certas áreas, está coberta por pequenas porções de formações continentais de idades terciárias e quarternárias, e ocasionalmente, do final do Mesozoico (Ferreira, A.M.P.J., 2000, 37). Como o Maciço Hespérico sofreu dobramentos e metamorfismo durante a orogenia hercínica, resistiu aos dobramentos associados à orogenia alpina (Araújo, M.A., 2002, p. 16). A norte está limitado pelo Mar Cantábrico, no seu flanco oriental que se prolonga de norte a sul da Ibéria, faz fronteira com a parte mesozoica da Cordilheira Cantábrica e as bacias do Douro e Tejo. Por seu turno o flanco ocidental é limitado pelo Oceano Atlântico e pela Orla Ocidental, e a sul pela bacia do rio Guadalquivir e Orla Meridional (Hevia, I.M., 2004, p. 164).

Vários autores elaboraram propostas para a divisão do Maciço Hespérico em zonas com base nas suas características estratigráficas, estruturais, metamórficas e magmáticas (Pérez-Estaún, A. [et al.], 2004, p. 22). Inicialmente, esta unidade foi divida em seis zonas geotectónicas por Lotze (1945) que de norte para sul são: zona Cantábrica, Astur-ocidental Leonesa, Galaico-Castelhana, Luso oriental-Alcudiana, Ossa-Morena, e por último Sul Portuguesa (Pérez-Estaún, A. [et al.], 2004, p. 22). Esta divisão foi revista, por Julivert et al. (1972), que ao unir as zonas Galaico-Castelhana e Luso oriental-Alcudiana criaram a Zona Centro-Ibérica. Adicionalmente, Farias et al. (1987) e Arenas et al. (1988) assumem a existência de uma nova unidade, a "sub-zona" da Galiza média-Trás-os-Montes que, grosso modo, engloba os materiais mais deformados e com um maior grau de metamórfico da zona Galaico-Castelhana (Dias, R. and Ribeiro, A., 2013, p. 57). Mais recentemente com Ribeiro & Sanderson, 1996 e Vera, 2004 (Ribeiro, A., 2013, p. 8) o maciço foi fracionado em unidades estruturais de primeira ordem: Terreno Ibérico (TI), Terreno Sul Português (TSP), e Terrenos Exóticos. Estas unidades estruturais albergam subunidades (ou unidades de segunda ordem), que correspondem às zonas do soco varisco (Ribeiro, A., 2013, 8) .

A área de estudo inserem-se na unidade estrutural Terreno Ibérico, mais especificamente na subunidade Zona Centro-Ibérica. Nas zonas mais elevadas do S. Paio, e mais a norte junto ao

mar, nota-se um predomínio das rochas ígneas. A rocha mais abundante é o granito, quando intacto apresenta-se como claro, azulado, muito rígido e compacto. Todavia, quando se encontra exposto aos agentes de meteorização adquire uma cor amarelada. Importante será dizer que o principal agente erosivo é a água que explora a rede de fraturas do maciço rochoso (Araújo, M.A., 2012).

# Capítulo 3. – Metodologia de Investigação

O termo deteção remota foi utilizado pela primeira vez no *U.S. Office of Naval Research*, pela cientista Evelyn Pruitt, na década de 60 do século XX (Campbell, J.B. and Wynne, R.H., 2011, p. 13). A deteção remota é ciência e a arte de obter informações sobre um objeto, área ou acontecimento, através da análise de dados adquiridos por um sensor que não está em contato com esse objeto, área ou fenómeno (Lillesand, T.M. [et al.], 2004b, p. 1).

De acordo com Sabins, F.F. (2007) a deteção remota deve ser encarada com um processo que engloba três etapas fundamentais: aquisição, processamento e interpretação.

A aquisição das imagens prende-se com a tecnologia utilizada para a obtenção de imagens. A segunda etapa refere-se aos procedimentos que convertem os dados primários, por exemplo, processamento das fotografias aéreas de forma obter um modelo digital de superfície (MDS). Por último, a interpretação que converte as a imagens em informação útil e valiosa.

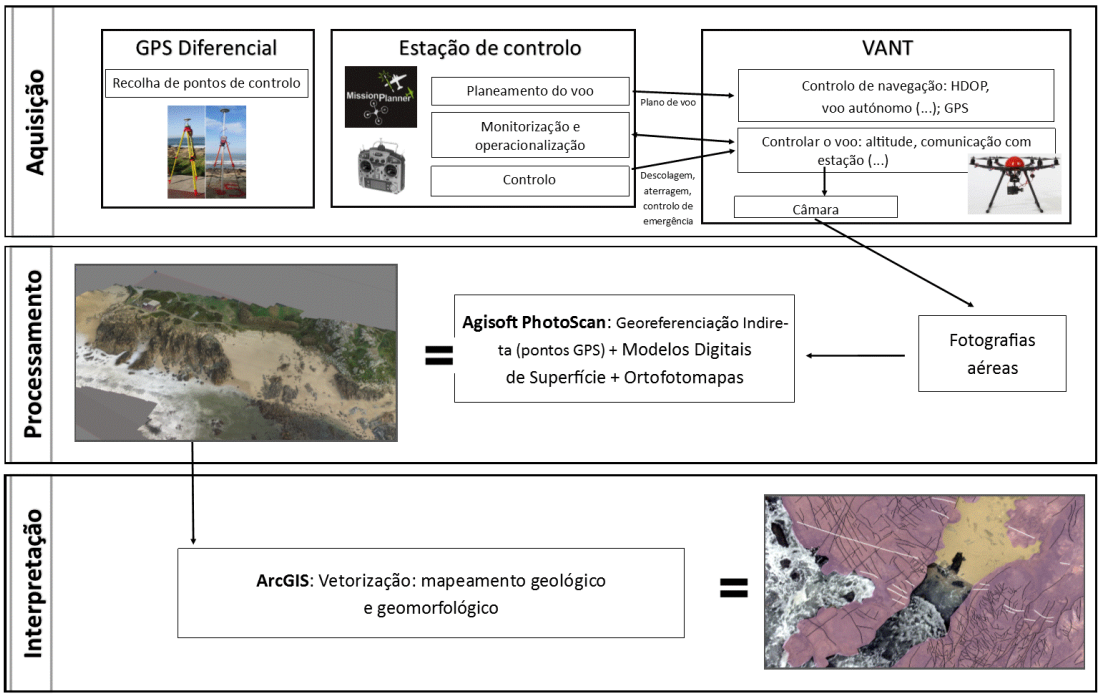



*Figura 9. Workflow do projeto seguindo propostas de Sabins (2007) e Kaneko e Nohara (2014).*

Uma das formas mais comuns, versáteis e económicas de deteção remota é a fotografia aérea (Lillesand, T.M. [et al.], 2004d, p. 58). A fotografia aérea permite a observação de um panorama global, como é que os objetos e as áreas de estudo se apresentam no espaço, uma vez que todas as características de superfície são registadas simultaneamente. Tal facto origina

distintas e diversas informações passíveis de ser extraídas, consoante o objetivo de cada estudo ou aplicação, uma vez que diferentes temáticas identificam e interpretam diferentes elementos (2004d, p. 58). Como se trata de um registo permanente, as fotografias aéreas podem ser, convenientemente comparadas com dados idênticos adquiridos em épocas anteriores, de forma a compreender que alterações ocorreram ao longo do tempo (2004d, p. 60).

## 3.1. Aquisição de dados

A aquisição de dados é uma etapa fundamental no desenvolvimento deste projeto. A informação requerida é proveniente, maioritariamente, de duas fontes: revisão bibliográfica e trabalho de campo.

### 3.1.1. Trabalho de Campo

O trabalho de campo foi efetuado ao longo do desenvolvimento deste projeto, nomeadamente de agosto de 2014 até setembro de 2015.

As saídas de campo tinham como principais propósitos a recolha de dados via VANT e GPS e a aquisição de dados a partir da observação direta para efetuar reconhecimento e interpretação geológica e geomorfológica da área de estudo.

Numa primeira fase os objetivos era cumpridos em simultâneo, ou seja, aproveitavam-se as idas ao local para fazer levantamentos. Após os primeiros esboços, as idas ao campo incidiam principalmente sobre a exploração e observação da superfície, com a intenção de validar e corrigir os dados criados, reforçando o reconhecimento e interpretação do terreno.

Deste modo, o ortofotomapa gerado com as imagens adquiridas consistia numa ferramenta fundamental não só para orientação mas como base cartográfica onde foram registados todos os apontamentos importantes. Com efeito para facilitar a localização, e aumentar a precisão dos esboços criados, o ortofotomapa foi dividido em quatro folhas (Figura 10). Por sua vez, as folhas foram repartidas por uma grelha retangular (11,25m x 15,30m).

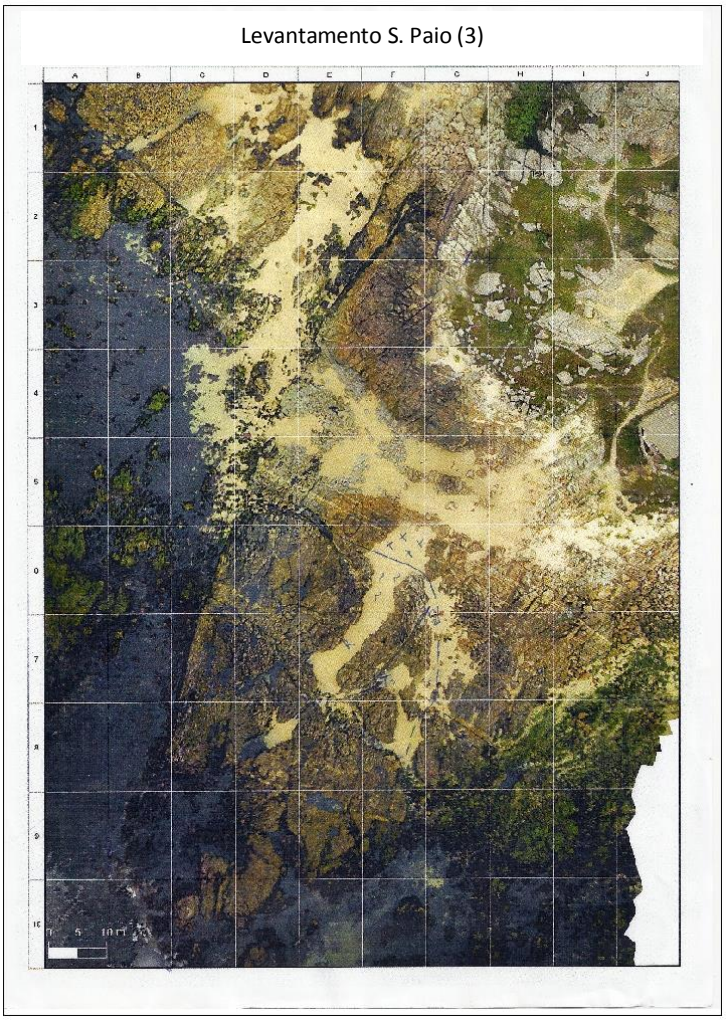



*Figura 10. Folha n.º3, correspondente à área sul do S. Paio, onde foi esboçado um limite litológico entre granito e migmatito.*

Com vista a um maior rigor, o mapeamento geológico foi concretizado com o apoio da colega geóloga (Cláudia Coelho, FCUP), o que permitiu melhorar significativamente a identificação dos vários tipos de rochas (granito, migmatitos e filões), contatos e deformações tectónicas. Para além do reconhecimento foram retiradas amostras e feitas medições, nomeadamente da largura dos filões, e ainda sobre as orientações das descontinuidades e dos filões.

#### 3.1.1.1. Voos

O uso das plataformas *multicopter* e controladas por rádio introduziu recentemente novos aspetos à fotografia aérea de baixa altitude (LAAP – *Low-Altitude Aerial Photography*) como a exploração de novas técnicas de imagem (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 44). Os veículos

*multicopter* têm como vantagens a capacidade de descolar e aterrar verticalmente, e possuem um voo estático e de precisão (Legarreta, P. and Pirola, A., 2015, p. 71).

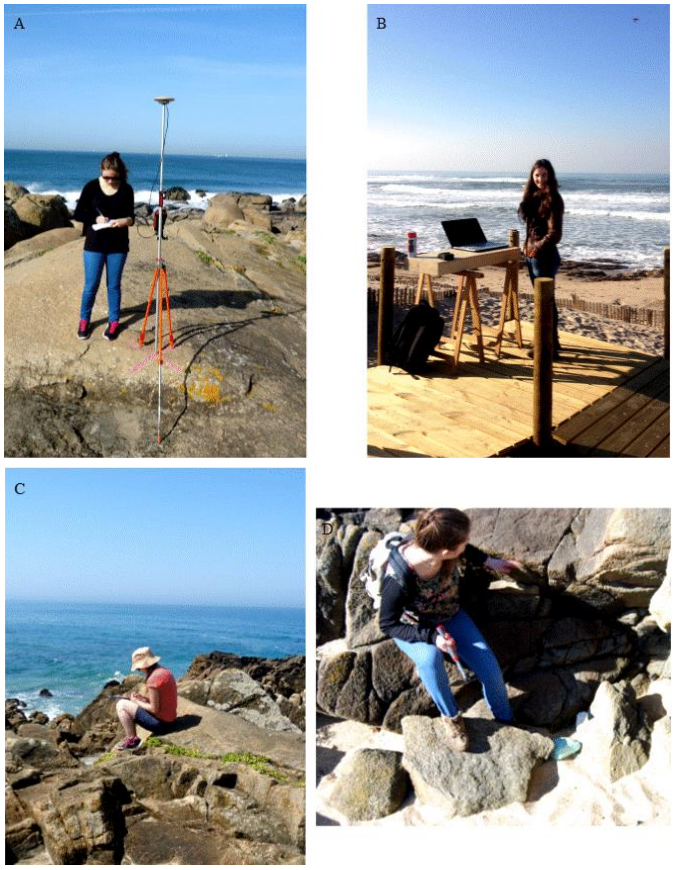



*Figura 11. Realização de trabalho de campo. A. Recolha de pontos GPS; B. Monitorização do voo do drone; C. Desenho de perfis longitudinais; Reconhecimento e interpretação geológica e geomorfológica.*

A utilização de VANTs permite que se realizem levantamentos de fotografias verticais (ou nadir) que geralmente são efetuados na aquisição de material básico para a geração de mapas (ortofotos) (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 33). A maioria das fotografias aéreas verticais são obtidas com câmaras apontadas para o solo, ao longo de linhas de voo (*flight lines*), ou tiras de voos (*flight strips*).

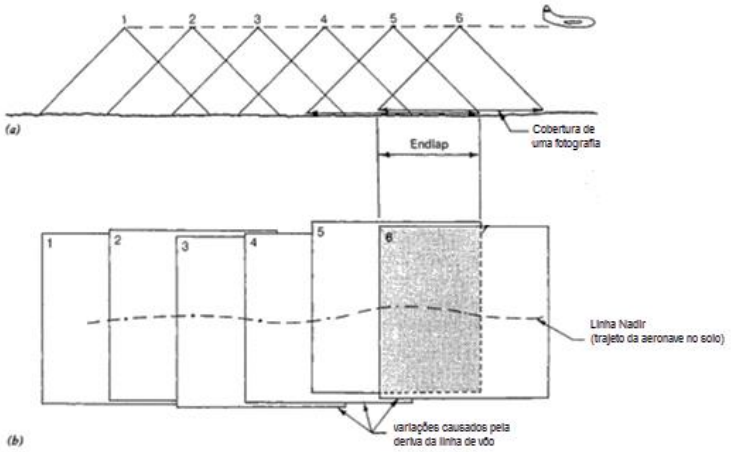



*Figura 12. Cobertura fotográfica ao longo de uma faixa de voo. a) Condições durante a exposição; b) posição das fotografias resultantes. Fonte: adaptado de Lillesand, T.M. [et al.], 2004a, p.130.*

As imagens são adquiridas em faixas paralelas com intervalos regulares geralmente com uma grande sobreposição, numa faixa do voo cada fotografia tem um grau de sobreposição longitudinal de cerca de 60 ± 5%. As faixas adjacentes têm em média uma sobreposição lateral de 25 - 40% (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 33). Contudo com vista a melhorar a qualidade de construção do modelo digital de superfície e do ortofoto, o manual do *software Agisoft Photoscan* aconselha uma sobreposição lateral de 60% e uma sobreposição longitudinal superior a 80% (Agisoft, L., 2013, p. 5). Este tipo de fotografias oferece uma vantagem na cartografia, uma vez que as distorções geométricas são menores quando comparadas à fotografia oblíqua (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 33).

A área de estudo foi fotografada por um VANT (Figura 13 e Quadro 1) equipado com uma câmara *Canon Powershot* sx260hs (12 megapixéis) a apontar diretamente para o solo. A altitude do voo é variável, entre os 25 - 40 metros, assim como a duração do tempo de voo, entre os 12-16 minutos, dependendo da velocidade do vento e da carga que transporta. A captura de fotografias sucessivas com um determinado grau de sobreposição longitudinal (*endlap*), é alcançada através do controlo do intervalo temporal entre a captação de fotografias. No caso de estudo o controlo é conseguido através do uso de uma aplicação no cartão de memória da máquina fotográfica, denominada por CHDK - *Canon Hack Development Kit*, em que se define o intervalo temporal entre as capturas. Por conseguinte, a máquina efetua os disparos automaticamente, consoante o intervalo pretendido.

*Figura 13. Apresentação do VANT utilizado.*

*Quadro 1. Especificidades do VANT usado neste estudo.*

| | |
|---|---|
| **Tipo** | **Hexacopter** |
| **Modelo** | DV6-S |
| **Classe** | 550 |
| **Controladora** | 3dr APM |
| **Firmware (da controladora)** | Arducopter 3.6 |
| **Peso Total** | 700+1800+90+60=2650g |
| **Tempo de funcionamento** | 12 – 16 minutos |

De forma a melhorar a qualidade das imagens obtidas e o sucesso dos voos existem fatores meteorológicos e oceanográficos que devem se considerados. Preferencialmente, os voos devem ser realizados em dias de pouca nebulosidade e de marés baixas vivas com o objetivo de fotografar a maior parte da plataforma de erosão marinha geralmente coberta pelo mar. O vento deve ser fraco para que o VANT mantenha a sua estabilidade, os motores não tenham de efetuar um maior esforço (consumindo mais energia e diminuindo a duração do voo), o risco de despenhamento seja reduzido, e também para que as imagens não fiquem desfocadas.

Observando a Figura 14, verifica-se que estava a ocorrer uma maré viva muito baixa (a 0,37 metros, muito perto do nível do zero hidrográfico que se situa 2 metros abaixo do nível médio das águas do mar em Cascais), o que é excelente para fotografar as plataformas que, normalmente,

se encontram submersas. No voo que foi realizado no período entre as 10:30 e as 12:00, a maré estava a encher e situar-se-ia entre 0,37 até aos 4,01 metros (às 16h), de acordo com o cálculo das marés aproximadas dada a amplitude de 3,64m, na primeira hora a partir das 10:30 a maré subiu 0,24m[13]. Ou seja, a maré estaria a uma altura de 0,61m acima do zero hidrográfico, o que significa que superfícies com cotas de até -1,4 m (abaixo do nível médio das águas do mar) foram fotografadas. A altura máxima da onda[14] era pouco superior a 2 metros, e o vento era muito fraco (0 a 1,6 kph)[15].

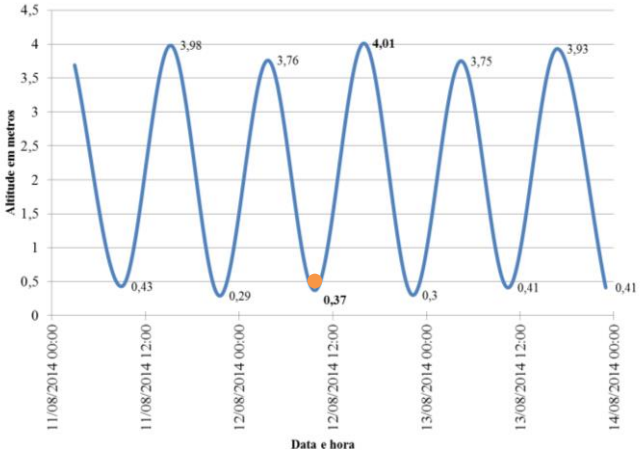



*Figura 14. Maré de Leixões do dia do voo (12 de agosto) e dos dias anterior e posterior. Fonte: Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal, Departamento de Engenharia Geográfica – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*

No segundo voo (cf. Figura 15) a altura mínima da maré baixa foi de 0,5m. No dia da concretização do voo por volta das 12:00, a maré encontrava-se a subir dos 0,5 para os 3,77 metros, nível que seria atingido às 17:07. Dada a amplitude 3,27, estima-se que das 10:54 até às 12:00 (primeira hora), a maré terá subido aproximadamente 0,22m, sendo que a sua altura no período de concretização do voo seria de cerca 0,72 acima do zero hidrográfico. Deste modo foi, igualmente, possível fotografar superfícies com cotas inferiores ao nível médio das águas do mar (neste caso até 1,30m). As alturas máximas das ondas eram de cerca de 3,20 metros. O vento era fraco cerca 3 quilómetros por hora.

[13] Segundo os dados da Agenda 2002 APDL - Administração dos Portos do Douro e Leixões, (2002)
[14] De acordo com dados cedidos pelo Instituto Hidrográfico.
[15] Consoante a consulta no sítio *Weather Underground* – Estação Leça da Palmeira-Sardoal, para o dia do voo.

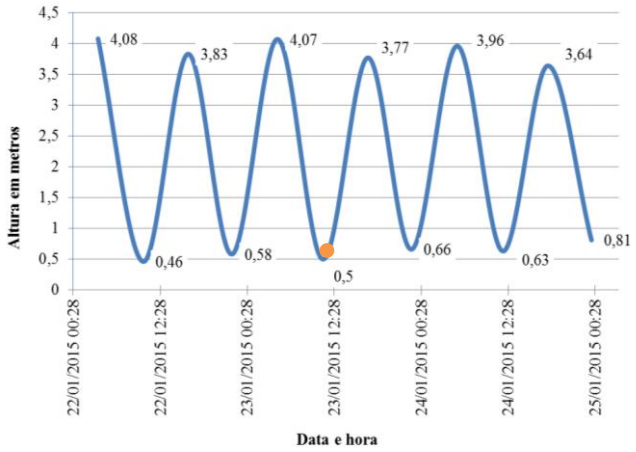



*Figura 15. Maré de Leixões do dia do voo (21 de Janeiro) e dos dias anterior e posterior. Fonte: Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal, Departamento de Engenharia Geográfica – Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*

Os voos foram programados com recurso ao *software open source Misson Planner*[16], que consiste numa aplicação "*Ground Station*" para projetos com piloto automático. Com este programa é possível planear, guardar e carregar missões (rotas de voos) em piloto automático, de uma forma muito simples ("*point-and-click*") através de vários mapas de base (nomeadamente Google Maps). Para além disso, enquanto o VANT está a voar é possível verificar vários parâmetros como: altitude (m), velocidade vertical e velocidade no solo (m/s), distância ao próximo "*waypoint*", HDOP e comunicação com estação (%).

#### 3.1.1.2. GPS

Os recetores GPS são utilizados para determinar a posição geográfica precisa de dados de referência (Lillesand, T.M. [et al.], 2004b, p. 25), como pontos de controlo no caso em estudo.

Conceptualmente, o processo de funcionamento do GPS é simples envolvendo apenas a medição do tempo requerido para que um sinal transmitido por um determinado satélite alcance o recetor de terra. Como o sinal viaja à velocidade da luz ($3x10^8$ m/s), a distância entre o satélite e o recetor pode ser calculada (Lillesand, T.M. [et al.], 2004b, p. 33). Assim, a posição tridimensional do recetor pode ser determinada através da medição dos sinais de apenas três satélites. No entanto, os sinais de quatro satélites são requeridos para corrigir o viés de relógio (*clock bias*[17]), que consiste numa falta de sincronização exata entre os relógios atómicos

[16] http://planner.ardupilot.com/wiki/mission-planner-overview/

[17] Segundo Van Sickle, J. (2008, p. 36) um dos maiores erros pode ser atribuído ao "s*atellite clock bias*", que comtempla dois assuntos: efeitos relativísticos e "*clock drift*".

extremamente exatos dos satélites e os relógios menos precisos dos recetores de GPS. Na prática, geralmente é desejável fazer medições repetidas com maior número de satélites possível (Lillesand, T.M. [et al.], 2004b, p. 34). O erro depende ainda da geometria do recetor (dispositivo GPS) e dos transmissores (satélites), uma vez que este fator influencia a precisão da posição.

A distribuição dos satélites acima do horizonte de um observador tem uma relação direta sobre a qualidade da posição derivada a partir deles (Van Sickle, J., 2008, p. 74). O GPS está sujeito a um fenómeno geométrico chamado de Diluição da Precisão (DOP), que diz respeito à geometria apresentada pelas posições dos satélites entre si e os recetores GPS. Os valores de DOP[18] devem ser baixos, pois indicam que os satélites, utilizados para o cálculo de uma posição estão espalhados pelo céu, diminuindo os erros de medição (Langley, R.B., 1999, p. 56). Por outras palavras, quando os satélites se encontram numa configuração ótima para uma posição fiável do GPS os valores são baixos, quando não estão, os DOP são elevados (cf. Figura 16) (Van Sickle, J., 2008, p. 74). Todavia, a receção do sinal pode ser afetada por obstáculos como a vegetação e barreiras topográficas (Martínez-del-Pozo, J.-Á. [et al.], 2013, p. 230).

As análises mais recentes de deteção remota envolvem, de alguma forma, dados de referência do terreno (*ground reference data*) e as operações fotogramétricas não são exceção (Lillesand, T.M. [et al.], 2004a, p. 166). A utilização de pontos de controlo é uma forma de obter dados de referência, referindo-se a pontos físicos no solo, cujas posições são conhecidas em

---

As teorias da relatividade de Albert Einstein previam que os relógios que orbitam à volta da terra, andassem mais rápido do que os relógios na superfície. E de facto andam, pois existe uma maior velocidade e uma gravidade mais fraca. Existem dois efeitos: dilatação do tempo (que é tomada em consideração antes do lançamento dos satélites, uma vez que a frequência dos relógios é definida para ser mais lenta, com vista a obter um funcionamento correto), e excentricidade orbital dos satélites de GPS. Ambos os efeitos relativísticos podem ser calculados e removidos.

Adicionalmente, existe outro fator, "*clock drift*", a bordo dos satélites existem quatros relógios independentes (dois de césio e dois de rubídio). Enquanto o tempo do GPS em si é concebido para ser mantido dentro de um microssegundo (1 μsec ou um milionésimo de segundo) da UTC (C*oordinated Universal Time*), com exceção do segundo adicional (*leap second*, uma adaptação de um segundo que é ocasionalmente aplicada à UTC, para manter a sua hora do dia perto do tempo solar médio. Sem esta correção, o tempo contado pela rotação da Terra afasta-se do tempo atómico devido às irregularidades da rotação da Terra), os relógios dos satélites podem ser mantidos à deriva até um milésimo de segundo, (1 msec ou um milésimo de segundo), a partir do tempo GPS.

[18] Uma vez que uma posição de GPS é derivada a partir de uma solução tridimensional existem vários fatores de DOP que são utilizados para avaliar as incertezas de uma posição. Por exemplo, existe a diluição da precisão horizontal (HDOP - latitude, longitude) e a diluição da precisão vertical (VDOP - altitude) onde a incerteza de uma solução para o posicionamento foi isolada nos seus componentes horizontais e verticais, respetivamente. Quando os componentes horizontais e verticais são combinados, a incerteza das posições tridimensionais é designada por diluição da precisão posicional (PDOP - 3D). A diluição da precisão temporal (TDOP) indica a incerteza do relógio. A diluição geométrica da precisão (GDOP) consiste numa combinação dos quatro componentes anteriores (HDOP, VDOP, PDOP e TDOP) (Van Sickle, J., 2008, p. 75).

relação a um sistema de coordenadas horizontal e/ou datum vertical (2004a, p. 166). Quando os dados de referência são mutuamente identificáveis, no chão e sobre as fotografias, podem ser utilizados para estabelecer uma posição espacial exata e a orientação de uma fotografia em relação ao solo no momento da exposição (2004a, p. 166-167). Este facto é muito importante para se conseguir extrair informação útil para cartografar e efetuar análises adicionais com as imagens aéreas, que devem ser georreferenciadas de forma absoluta (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 41). Deste modo, a recolha e retificação dos pontos de controlo permite que os dados derivados possuam uma maior precisão, e ainda que sejam removidas distorções óticas. De acordo com Neitzel, F. and Klonowski, J. (2011) existem dois tipos de georreferenciação, a direta e a indireta. A georreferenciação direta pode ser conseguida através da utilização de dados GPS recolhidos durante o voo, presentes nas fotografias capturadas. Já na georreferenciação indireta são requeridos pontos de controlo (*Ground Control Points* (GCP´s)) localizados na área de estudo (2011, p. 5). No caso de fotografias aéreas para efetuar uma georreferenciação completa o manual do *software Agisoft Photoscan* recomenda que se coloquem pontos de controlo distribuídos pela área de estudo, com o intuito de atingir uma maior qualidade, tanto na precisão geométrica como na precisão da geoferenciação (Agisoft, L., 2013, p. 5).

Visto isto, foi utilizado um GPS diferencial (LEICA SR20, cf. Figura 17) para recolher a localização de vários pontos de controlo. Este dispositivo, na realidade, é composto por dois dispositivos de GPS, um necessita de estar numa posição fixa (estação de referência, Figura 17A), e outro, móvel (*rover* – Figura 17B), a partir do qual se recolhem as coordenadas X,Y e Z dos pontos. O *rover* está montado numa haste que pode ser deslocada pela área de estudo, permitindo que os dados sejam extraídos em locais específicos, e ainda que o recetor esteja sempre à mesma altura do solo (2 metros), o que potencia a aquisição de medições fiáveis (Martínez-del-Pozo, J.-Á. [et al.], 2013, p. 231).

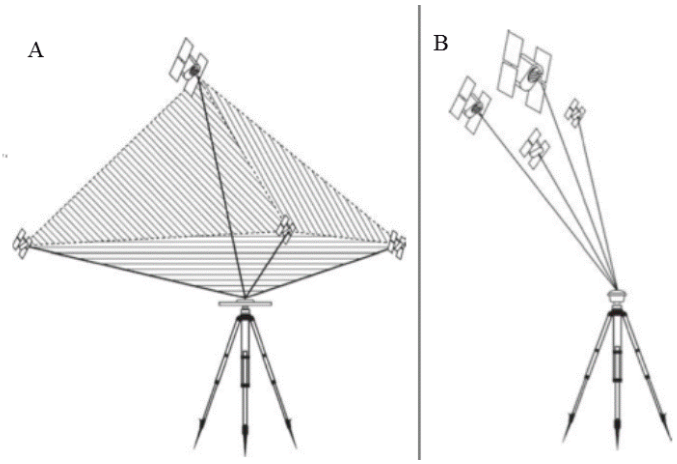



*Figura 16. A. Condições para obter um bom DOP, os satélites alcançam um grande volume de céu. O valor de DOP é baixo. B. Os satélites estão amontoados numa parte do céu, indica um mau DOP, o valor é alto. Fonte: adaptado de Van Sickle, J. (2008).*

Com vista a obter uma melhor precisão na medição, o GPS pode ser operado em dois modos (RTK e pós-processamento). O método RTK (*Real Time Kinematic*) é utilizado na fase de transporte do GPS diferencial, a estação base com coordenadas conhecidas, está a calcular o erro sistemático nas medições que envia através de ondas de rádio para o *rover* que recolhe os dados. Esta técnica vai calcular uma posição em tempo real, em relação à estação de base com uma precisão de poucos centímetros (2-3) (Martínez-del-Pozo, J.-Á. [et al.], 2013, Maune, D.F. [et al.], 2001). As medidas são corrigidas *in situ*, à medida que são recolhidas. Desta forma, este método de operação permite a disponibilidade imediata dos dados (Martínez-del-Pozo, J.-Á. [et al.], 2013, p. 231)

O método de pós-processamento, consiste na correção das medições com informações fornecidas por estações geodésicas fixas. Os dados são coletados por um recetor que armazena a sua posição, juntamente com a informação adicional sobre as efemérides dos satélites. As correções são constantemente calculadas pelas estações geodésicas e fornecidas como ficheiros RINEX (*Receiver Independent Exchange*) que podem ser adquiridas através do *download* e aplicadas aos dados com o *software* adequado. Este método implica o tratamento dos dados e, por isso, as medições não estão imediatamente disponíveis. Contudo o nível de precisão das medições corrigidas é muito elevado (inferior a 5 mm) (Martínez-del-Pozo, J.-Á. [et al.], 2013, p.232).

*Figura 17. GPS LEICA SR20. A. Estação fixa; B. Recetor móvel ou Rover, com marcação de um ponto de controlo.*

No caso em estudo, o levantamento de pontos de controlo foi feito antes de voo, utilizando o método RTK. Os pontos de controlos foram pré-marcados com alvos artificiais (como cruzes ou círculos vermelhos pintadas no solo, cf. Figura 17) para ajudar na sua identificação na imagem (2004a, p. 167).

Posteriormente os dados recolhidos com GPS foram trabalhados no *software Leica Geo Office*, onde os dados da estação fixa foram corrigidos a partir da estação de GPS/GNSS da ReNEP[19] localizada em Vila Nova de Gaia (com os ficheiros RINEX). Após a correção dos dados da estação fixa, os dados do *rover* são, igualmente processados e corrigidos, tendo como referência os dados corrigidos da estação fixa.

A precisão dos pontos de controlo é essencial para praticamente todas as operações de fotogrametria, uma vez que as medições fotogramétricas retiram a sua fiabilidade dos pontos de controlo de solo em que se baseiam. (2004a, p. 167).

[19] http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/geodesia/redes_geodesicas/renep/

## 3.2. Processamento de dados

O processamento de imagem digital é um assunto extremamente amplo, e que muitas vezes envolve procedimentos que podem ser matematicamente complexos (Lillesand, T.M. [et al.], 2004c, p. 491).

### 3.2.1. Structure-from-Motion e Dense Multi-View Stereo

A técnica *Structure-from-Motion* (SfM) consiste num método de restituição da superfície baseado em imagens, que assenta num dos mais recentes e automáticos métodos de registo imagem-a-imagem (Fonstad, M.A. [et al.], 2013, p. 421).

Esta técnica utiliza as imagens adquiridas em várias perspetivas, com o intuito de restituir a geometria tridimensional de uma superfície ou de um objeto (Fonstad, M.A. [et al.], 2013, p. 422), que é calculada com um conjunto de pontos tridimensionais que representam a estrutura da cena representada (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 42). Nesse sentido, requer elementos de imagens correspondentes, presentes em séries de sobreposição de fotografias capturadas pela câmara em movimento (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 42).

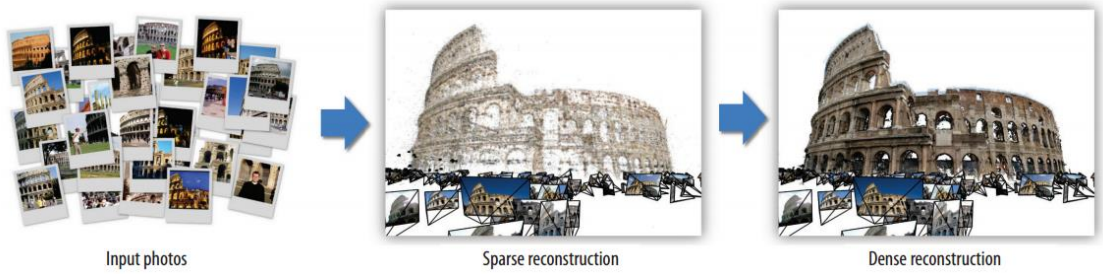



*Figura 18. SfM de imagens da internet. O objetivo do projeto era construir modelos 3D de edifícios através de imagens recolhidas na internet segundo Agarwal, S. [et al.], 2010, p. 41.*

A SfM baseia-se em algoritmos que detetam e descrevem elementos/características locais (*local features*) em cada imagem, onde realiza uma correspondência de pontos bidimensionais, em todas as imagens. Usando estas correspondências, a SfM calcula as localizações desses pontos em coordenadas locais (do *frame*) e produz a uma nuvem esparsa de pontos 3D que representa a geometria/estrutura da cena (2013, p. 43). A única condição é que cada ponto físico da superfície (ou objeto) a ser restituído tem de estar presente em várias imagens (2013, p. 422, Verhoeven, G., 2011), para calcular a sua localização na nuvem (para fazer a correspondência) e para calibrar os parâmetros da câmara (2013, p. 427).

A técnica é adequada a conjuntos de imagens com um elevado grau de sobreposição

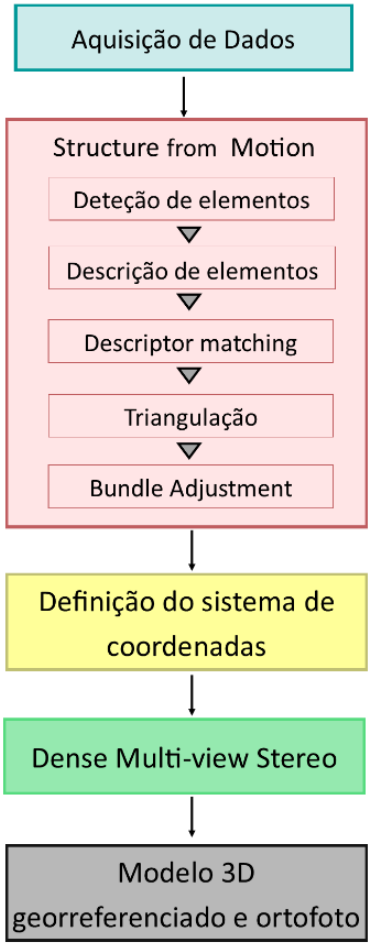



*Figura 19. Passos individuais de Sfm+MVS. Fonte: adaptado de Verhoeven, G [et al.] 2013.*

(Westoby, M.J. [et al.], 2012, p. 301). É mais eficiente em áreas de estudo de pequena dimensão, que podem ser sobrevoadas com VANTs que alojam câmaras digitais convencionais (em áreas pequenas estas câmaras possuem duas vantagens, têm uma resolução suficiente para capturar a textura detalhada e são leves para serem transportadas) (2013, p. 428).

Após a **aquisição das imagens** (primeira fase), é executada a técnica SfM, que pode ser subdivida em cincos etapas (como se apresenta na Figura 19).

Existem várias abordagens de **deteção de elementos** (*feature detection*, primeira etapa da SfM), que variam na eficácia, complexidade computacional e no tipo de elementos detetados. Na SfM a abordagem mais aplicada compreende a utilização de pontos de interesse (ou *keypoints*, ou pontos de correspondência) (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 44). Os pontos de interesse (IPs) representam locais na imagem que são de certo modo excecionais, e estão cercados localmente por texturas diferentes. Além disso, devem ser estáveis na imagem e na escala, sendo reprodutíveis em condições diferentes na imagem, ou seja, os IPs devem ter uma alta repetibilidade, o que significa que devem ser invariantes a qualquer mudança na iluminação, ruído da imagem e transformações geométricas básicas, tais como escala, translação, corte e rotação (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 44). Por exemplo, o ponto marcado na face da estátua central de Oceanus (Figura 20) representa um IP. Existem vários algoritmos para calcular os IPs, o algoritmo de SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*, um dos mais populares) baseia-se num processo de correspondência automática de imagem, utilizando imagens posicionadas aleatoriamente (2013, p. 422). Esta transformação consiste num sistema de reconhecimento de objetos, que identifica elementos nas imagens que são invariantes à escala e à rotação, e parcialmente invariáveis às condições de luminosidade e à perspetiva da câmara (Fonstad, M.A. [et al.] (2013), Westoby, M.J. [et al.] (2012)). O algoritmo de SIFT depende do brilho, e do gradiente de cor das imagens multiescala, com o fim de identificar os pontos na imagem que podem ser fiavelmente identificados como um

conjunto (2013, p. 422). Deste modo, são identificados vários IPs sobre todas as escalas e localizações em cada imagem. De salientar que o número de IPs em cada imagem depende, principalmente, da textura e da resolução da imagem (2012, p. 302). Os detetores de elementos não só reduzem as imagens para um tamanho mais manejável, como também produzem mais elementos/características robustos para as correspondências (Agarwal, S. [et al.], 2010, p. 42).

*Figura 20. Deteção de elementos e correspondência. (a) A posição e a orientação de elementos de SIFT apresentados numa imagem da Fonte de Trevi. (b) A linha corresponde a um ponto da face da estátua central de Oceanus na Fonte de Trevi segundo Agarwal, S. [et al.], 2010, p. 43*

A **descrição de elementos** (*feature description*, segunda etapa da Sfm) foca-se na procura de correspondências entre os IPs, o que significa que o algoritmo tem de encontrar quais os IPs que são representações 2D do mesmo ponto físico em 3D. Para isso os IPs tem de ser descritos (cf. Figura 21, na imagem superior (a) a cor dos pontos codificados nas arestas mostra a correspondência conhecida entre os pontos 2D da mesma cor nas imagens. Cada conjunto de pontos da mesma cor são projeções do mesmo ponto em 3D. Na imagem b) cada imagem tem uma posição e orientação associadas. A reconstrução em grande parte concorda com as projeções 2D observadas: quando o ponto vermelho 3D é projetado em cada imagem (linhas tracejadas), a projeção prevista está muito próxima da projeção observada. No caso da imagem 3, a projeção é um pouco fora, resultando num erro (de reprojeção) (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 44). Esta tarefa é realizada pelos chamados descritores ou vetores de elementos (*feature descriptor ou feature vectores*). Tal descritor calcula um vetor do elemento com as características locais para descrever uma correção local de pixéis em torno de cada IP. Assim como o IP, este vetor deve ser invariante (Verhoeven, G. [et al.], 2013, 44). Como já foi referido anteriormente, o método de SIFT é um dos métodos utilizados para descrever a correção de cada IP.

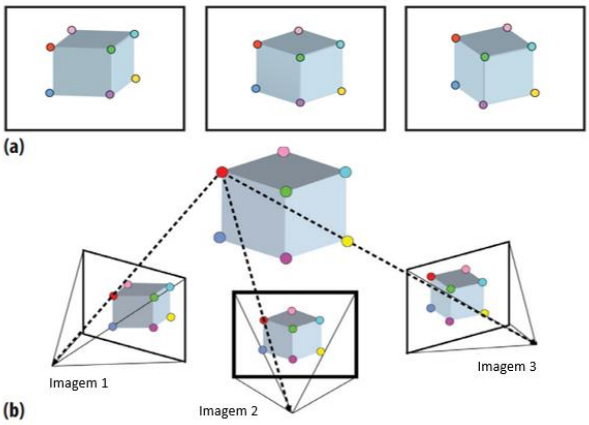



*Figura 21. a) Três imagens de um cubo a partir de pontos de vista. b) O cubo representa uma superfície a ser reconstruída com os pontos 3D (pontos coloridos) e imagens para a mesma coleção de imagens segundo Agarwal, S. [et al.], 2010, p. 42.*

Na etapa **correspondência dos descritores** (*descriptor matching)*, todos os vetores descritores são correspondidos entre diferentes imagens, através da associação de cada IP de uma imagem para outros IPs das restantes imagens (Verhoeven, G. [et al.], 2013, 44). Uma vez detetados os elementos numa imagem, estes podem ser combinados em pares de imagens diferentes através do encontro de elementos semelhantes (Agarwal, S. [et al.], 2010, p. 42). Os pares de correspondências são interligados a partir de pontos (dos elementos) em conjunto para formar linhas correspondentes ao mesmo ponto 3D na cena (cf. Figura 20, ponto na face de Oceanus e a linha laranja correspondente do mesmo ponto) (Agarwal, S. [et al.], 2010). De modo a calcular a correspondência é utilizada a distância entre os descritores (como por exemplo, distância euclidiana, cf. Figura 22). O tamanho do descritor tem uma influência direta no tempo de execução, com dimensões reduzidas a correspondência dos IPs é mais rápida, mas geralmente são menos distintos. Complementarmente, existem algoritmos que asseguram a rejeição da probabilidade de falsa correspondência, testando a sua consistência. Este processo é realizado em todos os pares possíveis, verificando se a putatividade das correspondências cumpre a restrição da geometria epipolar[20] (i.e. o deslocamento dos IPs são um resultado unicamente possível da movimentação da câmara entre ambas as imagens) (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 46). No final deste processo são obtidas as matrizes fundamentais, cada uma é uma matriz 3 × 3 dependendo nos setes parâmetros que descrevem o movimento (i. e. orientação relativa) desde a primeira

[20] A geometria epipolar é a geometria projetiva intrínseca entre dois pontos de vista (*views*). É independente da estrutura da cena e só depende dos parâmetros internos da câmara e da posição relativa (Hartley, R. and Zisserman, A., 2004, p. 239).

imagem até a segunda (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 46). O conjunto de correspondências de imagens (designados de *tie points*[21] em fotogrametria) para toda a sequência de imagens é obtida depois de serem considerados todos os pares de imagens significativos. O conjunto de IPs correspondentes conseguidos através destas funções, mais as matrizes fundamentais[22], são os dados de entrada requeridos para as últimas etapas da SfM (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 46).

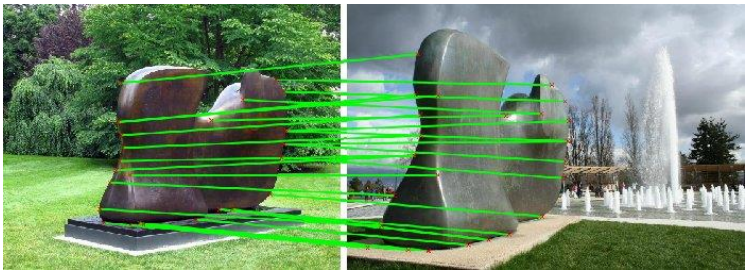


*Figura 22. Correspondência e distância euclidiana dos descritores (verde), tie points (vermelho). Fonte: http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/research/sculptures/*

Na **triangulação** (entre os pontos e as imagens, cf *Figura* 21), a técnica SfM calcula a localização dos pontos num sistema de coordenadas locais, criando uma nuvem esparsa de pontos 3D, que representa a geometria/estrutura da cena (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 46). A triangulação da imagem requer que sejam conhecidas as orientações interiores e exteriores da imagem. Estas orientações são conseguidas após a combinação de todas as orientações relativas em pares na forma da matriz fundamental. A técnica baseia-se no teorema da reconstrução projetiva, que afirma que se um conjunto de pontos correspondentes em duas vistas são definidos pela matriz fundamental, então a geometria da cena 3D e as matrizes de projeção das imagens podem ser reconstruídas a partir das correspondências e quaisquer duas reconstruções vindas dessas correspondências são projetivamente equivalentes (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 46). Todavia, para além de uma reconstrução projetiva, é necessária uma reconstrução métrica, ou seja, os planos ortogonais são ângulos retos, as linhas paralelas permanecem paralelas e a reconstrução do modelo 3D é uma versão reduzida da realidade (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 47).

---

[21] Segundo *GIS Dictionary* (ESRI), *tie point*, consiste num ponto numa imagem digital ou fotografia aérea que representa o mesmo local numa imagem ou fotografia aérea adjacente. Geralmente apresentam-se como um par, e podem ser usados para ligar imagens e criar mosaicos.

[22] A matriz fundamental é a representação algébrica da geometria epipolar (Hartley, R. and Zisserman, A., 2004, p. 239). Em *computer vision*, a matriz fundamental é uma matriz 3 × 3 que relaciona os pontos correspondentes em imagens estéreo. Na geometria epipolar, com uma imagem e as coordenadas, X e X', de pontos correspondentes num par de imagens estéreo, Fx descreve uma linha (linha epipolar) onde o ponto correspondente de X (X') deve situar-se na outra imagem. Isto é válido para todos os pares de pontos correspondentes (Reviews, C.T., 2012).

Até à etapa ***bundle adjustment*** as imagens estão tratadas em pares, em que, para cada par é calculada uma matriz fundamental. Depois dos pares de imagens estarem orientados, são combinados para formar um bloco completo de imagens e produzir a estrutura da cena (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 47). O resultado deste procedimento não é ótimo, uma vez que não são utilizadas todas as imagens sobrepostas ao mesmo tempo. Para ultrapassar este problema, é necessário executar a última etapa da técnica SfM, que consiste no *bundle adjustment.* Este algoritmo otimiza a estrutura tridimensional e a matriz de projeção de todas as imagens simultaneamente, efetuando uma robusta minimização não-linear dos atuais erros de medição (também conhecidos como erros de reprojeção) (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 47). O termo *bundle* (feixe) vem do facto de que feixes de raios que conectam os centros da imagem/projeção aos pontos da cena 3D (cf. Figura 23), são ajustados para minimizar a diferença da soma dos quadrados, entre os pontos de imagens observados e reprojetados. Isto significa que a abordagem SfM consegue recuperar a estrutura da cena e as matrizes de projeção da câmara através da correspondência de imagens, sem o conhecimento prévio sobre as posições da câmara ou orientação interna. Não é necessário, por isso, calibrar a câmara durante a fase de aquisição de dados, o que torna o processo flexível (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 47).

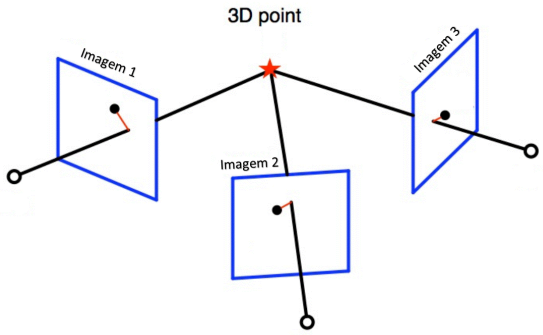



*Figura 23. Bundle Adjustment. Fonte: adaptado de http://vindelman.net.technion.ac.il/research/incremental-light-bundle-adjustment-for-structure-from-motion-and-autonomous-navigation/*

A imagem 3D reconstruída obtida após uma abordagem SfM é expressa num sistema de coordenadas local e equivalente ao mundo real até uma escala global, rotação e translação. (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 47 ). Estes parâmetros só podem ser recuperados através da utilização de dados adicionais, que, por sua vez definem um sistema de coordenadas de referência (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 47 ). Segundo o mesmo autor existem duas formas de alcançar este objetivo, que envolvem a importação de pontos de controlo (GCPs) ou posições da câmara

com elevada precisão. A primeira abordagem apresenta-se como a melhor solução, uma vez que consegue corrigir erros, como desvios na câmara e localizações pontuais, evitando a instabilidade do algoritmo *bundle*, enquanto os dados de saída já se encontram diretamente georreferenciados.

Na penúltima fase (**Dense MVS**) já existe uma esparsa reconstrução 3D da cena (cf. Figura 24). É esparsa porque se baseia, apenas, na reconstrução dos IPs. Com o conhecimento da orientação das imagens, é possível criar um modelo tridimensional denso e texturizado, e ortofotomapas (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 48).

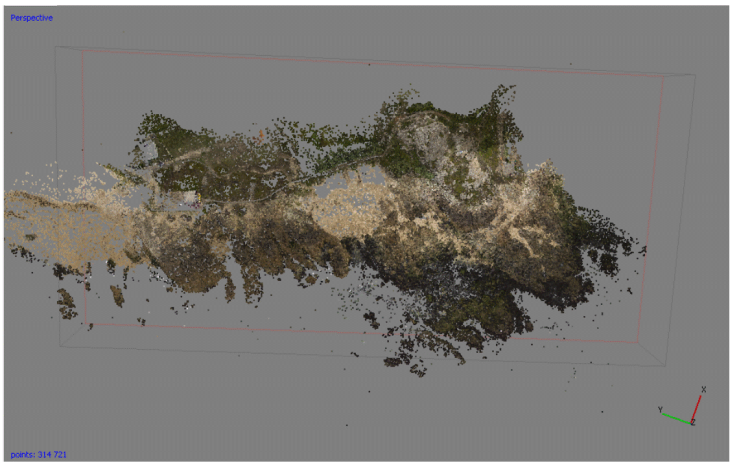



*Figura 24. Exemplo de uma nuvem de pontos esparsa da área de estudo, na qual já se reconhece a superfície da cena.*

O passo essencial deste processo é calcular um modelo 3D mais denso. Com esse fim é efetuado o algoritmo MVS (*Multi-view Stereo*) que calcula uma estimativa densa da geometria observada na cena. Os algoritmos MVS recuperaram a informação geométrica 3D da mesma forma que o sistema visual humano percebe a profundidade por fusão de dois pontos de vista. Quando os olhos de uma pessoa vêm um ponto numa superfície, a mente dessa pessoa combina a aparência desse ponto entre os dois pontos de vista (os dois olhos), e em seguida cruza as linhas de vista para esse ponto (triangulação - dado o ponto na superfície e os dois pontos de vista) de forma a perceber sua profundidade (Agarwal, S. [et al.], 2010, p. 43). Com MVS, existem muitos pontos de vista que vêm o mesmo ponto e pode usá-los simultaneamente para a fazer uma estimativa da profundidade (Agarwal, S. [et al.], 2010, p. 43). Devido a este algoritmo operar nos valores dos píxeis (em vez dos pontos) permite a geração de modelos 3D detalhados (ou nuvens densas de pontos) a partir do cálculo da nuvem esparsa de pontos, o que torna possível a reprodução dos detalhes mais pormenorizados presentes na cena (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 48).

O modelo 3D final pode ser considerado um **MDS**, ou seja, uma representação numérica

da topografia, e de todas as estruturas, como árvores e casas (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 48). Quando se combina as posições da câmara calculadas anteriormente e os parâmetros de orientação interna, o MDS denso permite a geração de **ortofotomapas** verdadeiros (no qual objetos com uma determinada altura são posicionados com um elevado grau de precisão), uma vez que o processo tem em consideração as deformações geométricas mais relevantes.

Em síntese, a SfM é uma técnica de medição tridimensional, em que a medição da superfície em várias perspetivas, resulta numa nuvem de pontos tridimensionais (X, Y, e Z) (Micheletti, N. [et al.], 2014). Elementos como a densidade, nitidez, resolução[23] e textura do conjunto das imagens vão determinar a qualidade da nuvem de pontos (Westoby, M.J. [et al.], 2012, p. 303). É com base na nuvem de pontos criada que é reconstituída a superfície e gerado o modelo tridimensional.

Os dados produzidos pelo método SfM são de grande qualidade, e com uma resolução comparável à dos dados LiDAR (com uma precisão igual ou superior), mas com uma facilidade de utilização inédita e um custo muito reduzido. A aquisição de dados via TLS[24] é duas ou três vezes mais cara; no caso da estação total o custo é o mesmo, todavia a densidade de pontos da nuvem é menor (Fonstad, M.A. [et al.], 2013, p. 422; 426). Tal facto pode consistir num salto metodológico se for transmitido para os estudos geomorfológicos (Fonstad, M.A. [et al.], 2013, p. 422).

### 3.2.2. Agisoft PhotoScan

O *software PhotoScan* é produzido pela empresa russa Agisoft LLC, e consiste num produto comercial que realiza o processamento fotogramétrico de imagens digitais e gera dados espaciais em três dimensões a partir de imagens arbitrárias (Agisoft, L., 2013, Neitzel, F. and Klonowski, J., 2011, p. 3). Foi construído para operar em vários sistemas operativos Windows, MAC OS e Linux (Agisoft, L., 2014), e utiliza uma grande variedade de ficheiros (JPEG, TIFF, PNG, BMP ou MPO) para criar modelos tridimensionais acompanhados por texturas de forma automática. Ainda assim o utilizador é capaz de introduzir alguns parâmetros durante o processamento (Verhoeven, G., 2011, p. 68).

A tecnologia aplicada vem da pesquisa da área de *computer vision* (que desenvolve técnicas

[23] Diminuindo a distância entre a câmara e a superfície, há um aumento da resolução espacial da fotografia, o que vai melhorar a densidade e resolução espacial da nuvem de pontos final (2012, p. 302)

[24] Sigla para Terrestrial Laser Scanning. Subtecnologia LiDAR, relacionada com a obtenção de dados através da utilização de um sensor laser ativo, de onde advém o significado do acrónimo LiDAR, Light Detection and Ranging, isto é, deteção e medição através da luz (Pereira, A., 2012, p.20).

para recuperar a forma tridimensional e a aparência dos objetos em imagens) e utiliza as técnicas SfM e *dense stereo-reconstruction* (Verhoeven, G., 2011, p. 67). Apesar do programa ser capaz de reconstruir vários objetos, vários testes revelam que o *Agisoft PhotoScan* se distingue no processamento de imagens aéreas (Verhoeven, G., 2011, p. 67).

Após o voo, foram selecionadas as imagens que integram a construção do modelo tridimensional. O processo de seleção das imagens mais adequadas baseia-se na qualidade e interesse da imagem obtida, ou seja, devem-se descartar as imagens que foram capturadas durante a descolagem e aterragem, as que estão desfocadas, subexpostas (i.e. fotografia exposta a pouco luz, ficando muito escura) ou superexpostas (i.e. fotografia exposta a muita luz, ficando muito clara), e por último, as que não cobrem a área de interesse (Neitzel, F. and Klonowski, J., 2011, p. 3).

Após a seleção das fotografias e adição ao programa, o processo para a criação dos modelos 3D e ortofotomapa compreende quatro etapas fundamentais, ilustradas na Figura 25:

1. Alinhamento (*Align Photos*);
2. Construção da nuvem densa de pontos (*Build Dense Cloud*);
3. Construção do modelo 3D (*Build Mesh*);
4. Construção da textura (*Build Texture*).

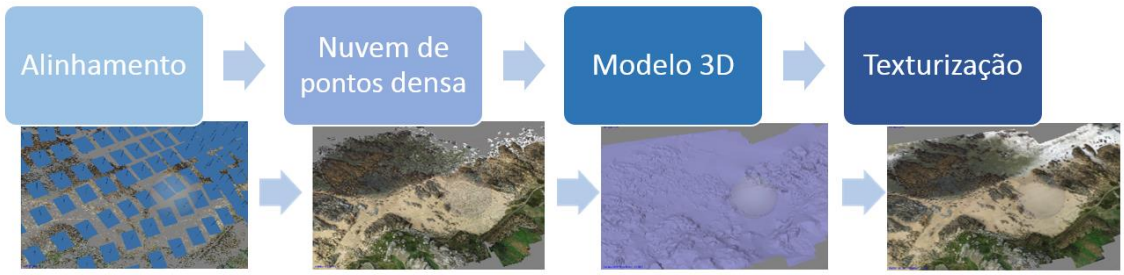



*Figura 25. Workflow do software Agisoft PhotoScan.*

Na primeira etapa o programa utiliza a técnica SfM, pela qual procura identificar pontos em comum (IPs) nas fotografias e combina-os, conseguindo encontrar a posição de cada imagem e melhorando, assim, os parâmetros de calibração. Deste procedimento advém uma nuvem de pontos dispersa (que não é necessária para a construção do modelo tridimensional) e um conjunto de posições da câmara (que já é requerida pelo programa para a criação do modelo), e ainda os parâmetros internos de calibração sendo a distância focal (*focal length*), o principal ponto de localização, assim como coeficientes de distorção (três radiais e dois tangenciais) (Agisoft, L., 2013, Verhoeven, G., 2011, p. 68). Antes da iniciação desta etapa e se é pretendida a utilização

de GCPs, convém verificar se as fotografias estão no mesmo sistema de coordenadas que os pontos de controlo. Neste caso as fotografias estavam em WGS84 e foram convertidas para ETRS 89 Portugal TM06. O tempo requerido para a conclusão deste procedimento varia consoante o parâmetro de precisão selecionado (*High* é o mais demorado).

A implementação dos GCPs (ou "*Place Markers*"), requer a construção do modelo 3D (*mesh*) a partir da nuvem de pontos dispersa (criada com o alinhamento das fotografias). Após a concretização deste processo, seleciona-se uma fotografia e coloca-se um ponto de controlo no local correspondente (este é assinalado por uma bandeira azul, cf. Figura 26), de seguida filtram-se todas as fotografias, para apenas aparecerem aquelas onde está presente o ponto de controlo inserido. Após terem sido abertas individualmente verifica-se se a localização do ponto está correta, caso não esteja basta arrastar o ponto de controlo para o seu devido lugar (ficando este ponto sinalizado com uma bandeira verde). Quando os GCPs estiverem todos inseridos, importam-se as suas coordenadas a partir de um ficheiro de texto separado por tabulações (*.txt). Convêm que as vírgulas presentes nas coordenadas sejam substituídas por pontos finais, e que os pontos de controlo tenham o mesmo nome que os pontos inseridos no *PhotoScan*. De seguida define-se o sistemas de coordenadas dos pontos, e utiliza-se a função de otimizar o alinhamento das fotografias (para este procedimento devem apenas estar selecionados os GCPs, ver lado esquerdo da Figura 26). Nesta fase, os parâmetros de orientação externa são otimizados e os parâmetros de orientação interna da câmara (i. e. distância focal), coordenadas do ponto central e distorção da lente podem ser calibrados (Vidal, A., 2013, p. 46).

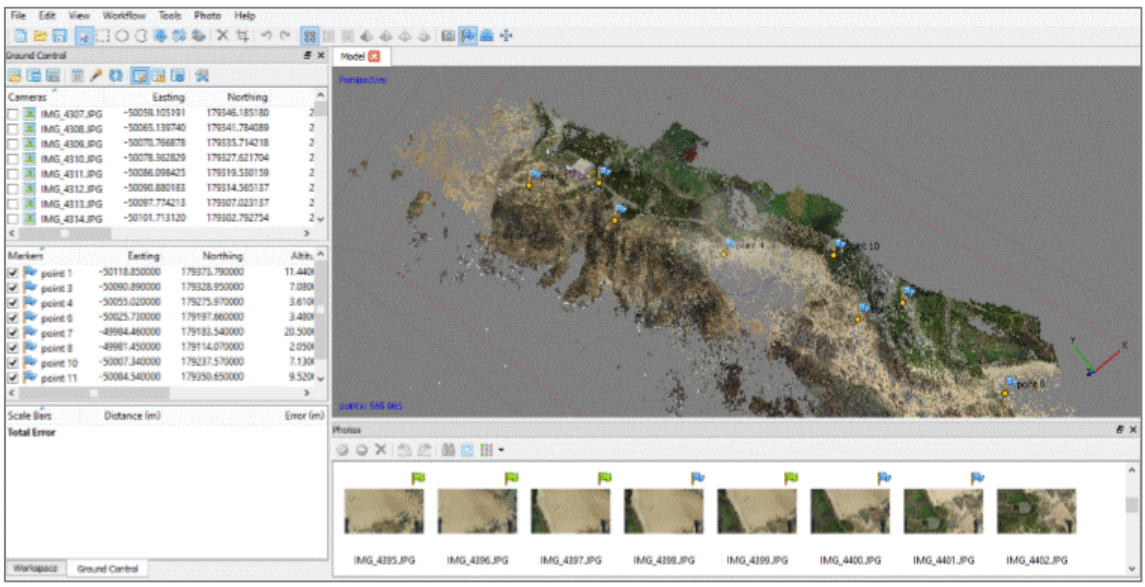


*Figura 26. Distribuição dos pontos de controlo no modelo 3D (com base).*

O passo seguinte consiste na construção de uma nuvem densa de pontos (com base no algoritmo MVS, (Verhoeven, G. [et al.], 2013, p. 49)), através da estimativa das posições das fotografias (Agisoft, L., 2013). O programa produz nuvens densas de pontos com a mesma densidade (se não mais densa) que as nuvens de pontos criadas pelo LiDAR (Agisoft, L., 2013, p. 11). Esta etapa é das mais demoradas, mas a lógica dos parâmetros de seleção mantêm-se, quanto maior a qualidade pretendida maior será o tempo de processamento.

A terceira fase prende-se na construção do modelo, ou seja, a partir da nuvem densa de pontos, o *software* reconstrói uma malha poligonal e tridimensional que representa a superfície do objeto. A malha pode ser editada para se procederem a algumas correções como: remoção de componentes, fechar buracos, etc. O *Agisoft PhotoScan* tem tendência a criar modelos tridimensionais com uma resolução geométrica excessiva, por isso é recomendado que antes de exportar se simplifique a malha (comando *decimate mesh*). Este procedimento evita uma diminuição da performance noutros programas (Agisoft, L.).

Por último, após o modelo 3D (a geometria) estar concluído, é possível acrescentar textura à superfície.

Terminadas todas as etapas os resultados podem ser exportados, sob a forma de ortofotos

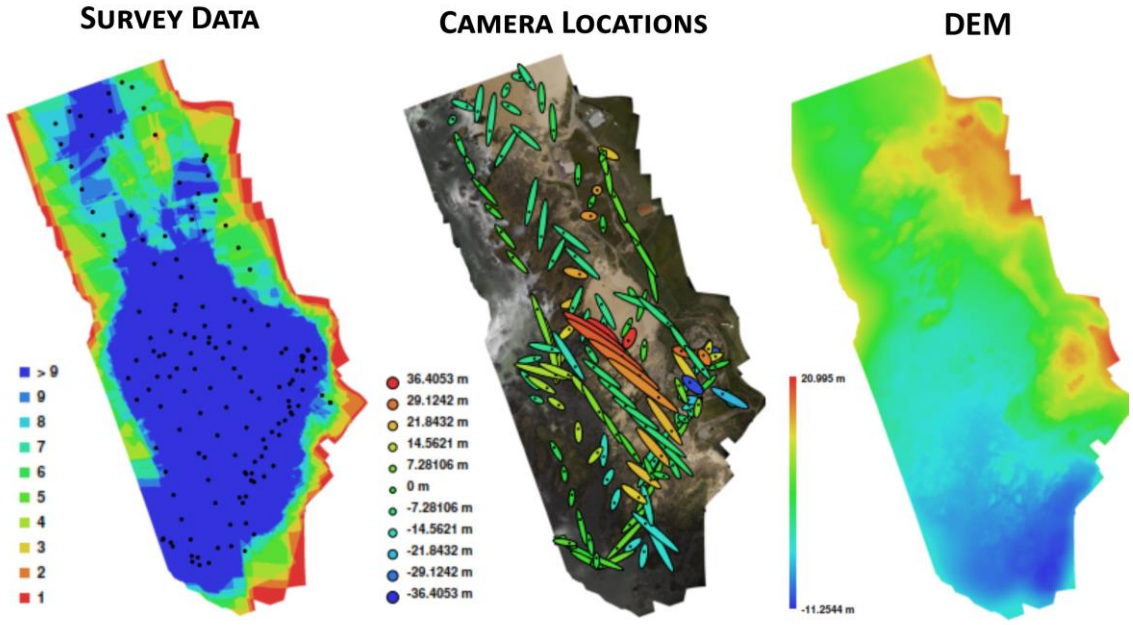



*Figura 27. Exemplo dos produtos derivados presentes no Processing Report do Agisoft PhotoScan.*

e/ou modelos digitais de superfície. Deste modo, a reconstituição fotogramétrica assume-se como um método para a construção de MDSs, que depende das propriedades estereoscópicas de várias fotografias que partilham uma área de sobreposição (Martínez-del-Pozo, J.-Á. [et al.], 2013, p. 232). O ortofotomapa obtido através deste processo possuí uma resolução espacial de 1,8 centímetros e o MDS cerca de 3cm

Adicionalmente, o *software* produz um relatório (Figura 27) onde constam várias informações: *Survey Data*, *Camera Locations*, *Digital Elevation Model*. Em *Survey Data* constam as localizações da câmara, sobreposição das fotografias e informações da câmara fotográfica (modelo, resolução, distância focal e tamanho do píxel). No segundo item são apresentadas as localizações da câmara assim como os erros estimados. Por último, é exibido um modelo digital de elevação reconstruído, resolução e densidade de pontos.

### 3.2.3. Modelos digitais de elevação

A técnica SfM foi adaptada para criar modelos digitais de elevação, usando imagens adquiridas a partir de várias plataformas: câmara digital e um *helikite* (Fonstad, M.A. [et al.], 2013), *smartphone* e câmara digital (Micheletti, N. [et al.], 2014). Tal com outros modelos, estes são uma representação simplificada da realidade (Martínez-del-Pozo, J.-Á. [et al.], 2013, p. 228).

Na bibliografia consultada existe alguma confusão e divergência em relação à conotação dos modelos, uma vez que existem várias denominações tais como: modelo digital de elevação (MDE), modelo digital de terreno (MDT) e modelo digital de superfície (MDS).

Segundo Maune, D.F. [et al.] (2001) o MDE é um termo genérico para dados topográficos e/ou batimétricos digitais, nas suas variadíssimas formas. É designado de "modelo" porque os computadores usam esses dados para modelar e analisar automaticamente a topografia da Terra em três dimensões. Os MDE são criados a partir de pontos ou linhas com uma posição conhecida num determinado sistema de coordenadas, associado a um valor da variável que se pretende representar (por exemplo: cotas no caso da elevação) (Martínez-del-Pozo, J.-Á. [et al.], 2013, p. 228).

Quando um MDE considera as elevações do terreno (altitude da terra nua, "*bare earth*") sem vegetação e infraestruturas artificiais, é denominado por modelo digital de terreno (MDT) (Maune, D.F. [et al.], 2001, p. 1).

O MDS é similar aos MDE ou MDT, com a exceção de que o MDS descreve a elevação do topo da superfície (refletida) de edifícios, árvores, torres, e outras infraestruturas que estejam elevadas acima da terra nua (Maune, D.F. [et al.], 2001, p. 2).

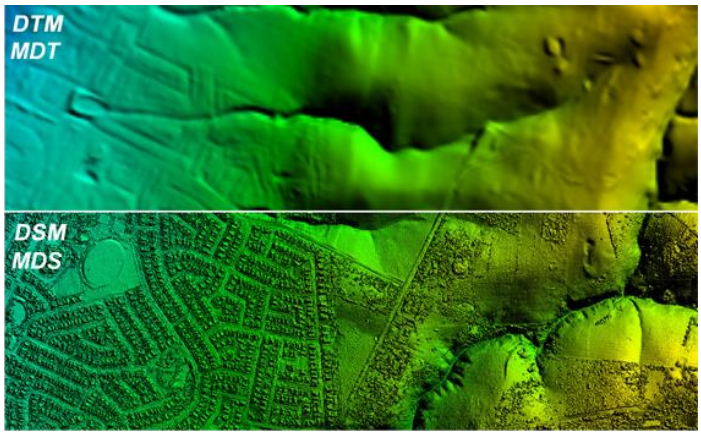



*Figura 28. Distinção entre MDT e MDS. Fonte: http://aerometrex.com.au/blog/wp-content/uploads/2011/12/dsm_dtm_adelaide.jpg*

Os MDEs são um produto com uma vasta aplicabilidade em análises geográficas de acontecimentos (ou fenómenos) espaciais, assumindo uma grande relevância no geoprocessamento. A partir dos MDE é possível extrair várias informações e efetuar diversas operações tais como: o cálculo de volumes, análise de perfis e de seções transversais, geração de imagens em níveis de cinzento, geração de mapas de declives, de exposição, de visibilidade, de drenagem, de curvas de nível, etc., sendo todas estas tarefas fundamentais na realização de planeamento, ordenamento, elaboração e implantação de projetos (Falcão, I.O., 2012, p. 8 e 9).
A construção e aplicação do MDE englobam as seguintes etapas/tarefas (cf. Figura 29). Neste *workflow* o MDE está no centro de interações, entre a aquisição de dados e as aplicações. Estas interações são suportadas pela criação do MDE e a análise de dados (Hutchinson, M.F. and Gallant, J.C., 2000, p. 29).

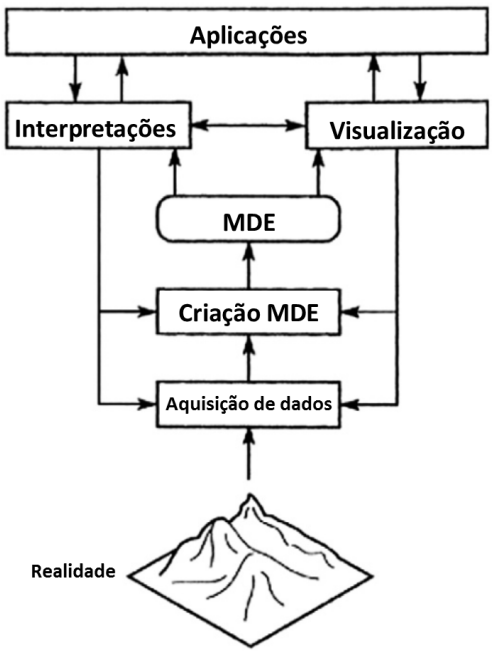



*Figura 29. Etapas principais da modelação digital de terreno. Adaptado de Hutchinson, M.F. and Gallant, J.C. (2000)*

A aquisição de dados forma a base para a geração do MDE. A criação do MDE representa uma amostragem dos dados originais do terreno. Por sua vez, o MDE já é uma representação do terreno ou da superfície. Nas etapas de interpretação e visualização o MDE é alvo de uma análise, sendo possível a extração de informação (através da vectorização, por exemplo). As aplicações formam o contexto para a modelação digital de terreno, uma vez que cada aplicação em particular tem os seus requerimentos funcionais e específicos em relação às outras tarefas da modelação digital (Weibel, R. and Heller, M., 1991, p. 270).

A maioria dos dados para a criação de MDEs são derivados a partir de três fontes alternativas: levamentos de campo, aquisição de dados fotogramétricos, ou digitalização cartográfica. Ocasionalmente podem ser utilizados outros métodos tais como: radar, sonar e LiDAR (Weibel, R. and Heller, M., 1991, p. 270).

*Figura 30. Modelo Digital de Superfície, elaborado no Agisoft Photoscan, da área de estudo elaborado com as fotografias do voo realizado em agosto 2014.*

No caso de estudo, o MDS (que considera os elementos assentes sobre o terreno) foi efetuado a partir da posição de uma coletânea de fotografias, sendo que todas elas possuem informação geográfica.

Apesar da origem dos dados ser distinta, o processo de construção de *MDE* mais comum baseia-se na triangulação (Falcão, I.O., 2012, p. 9). A rede irregular triangular (ou TIN – *Triangulated Irregular Network*) consiste num conjunto de triângulos adjacentes, não sobrepostos, calculados através pontos com coordenadas de X, Y e Z. A TIN é elaborada a partir de um conjunto de pontos, linhas ou polígonos com uma distribuição irregular, sendo estes interpretados como "*mass points*[25]*"* e *"breaklines*[26]*"*, onde são armazenadas as relações topológicas entre os triângulos e os seus vizinhos adjacentes. Esta rede é excelente para calcular declives, exposição de vertentes, área e comprimento de uma superfície, análises volumétricas e de aterro e desaterro (*cut-fill*), geração de curvas de nível, e interpolação de valores de altitude na superfície (Maune, D.F. [et al.], 2001, p. 2).

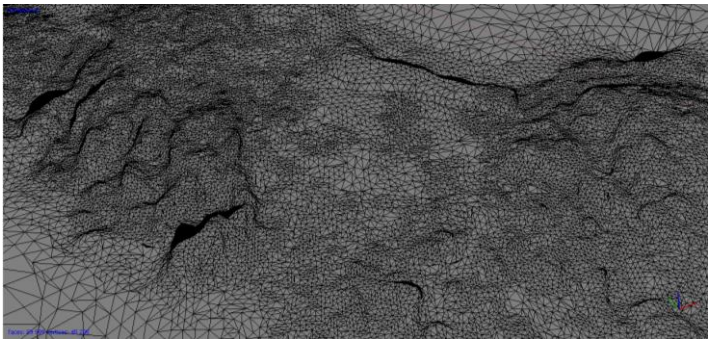


*Figura 31. Modelo TIN da área de estudo, elaborado no Agisoft Photoscan, que serviu de base para a concretização do MDS apresentado na Figura 30.*

[25] São pontos distribuídos de forma irregular, em que cada um possuí uma localização x/y e um valor de z (Maune, D.F. [et al.], 2001, p. 3).

[26] São elementos lineares que descrevem mudanças na suavidade ou na continuidade do terreno. Uma *soft breakline* assegura que os valores de altitude são mantidas (p. ex. elevações ao longo de gasodutos, ou de estradas), e certifica-se que a estrutura linear e as fronteiras dos polígonos são mantidas na superfície do TIN, forçando as *breaklines* como extremidades da TIN (Maune, D.F. [et al.], 2001, p. 2).

## 3.3. Interpretação de dados

Os ortofotos, como todos os mapas, têm uma escala e tal como as fotografias mostram o terreno em detalhe real (Lillesand, T.M. [et al.], 2004a, p. 171). Os ortofotos conseguem oferecer o '*melhor de dois mundos'*, um produto que pode ser facilmente interpretado como uma fotografia, e onde as verdadeiras distâncias, ângulos e áreas podem ser medidas diretamente. Devido a estas características, os ortofotos constituem excelentes mapas de base para a compilação, sobreposição e edição de dados num ambiente SIG (2004a, p. 171). O orfotofoto e o modelo digital de terreno criados, anteriormente no *Agisoft Photoscan*, são inseridos no *software* ArcGIS. É a partir destes elementos que se procede à interpretação dos dados e à derivação de informação.

O mapeamento geológico envolve a identificação de formas de relevo, tipos de rocha, estruturas rochosas (dobras, falhas, fraturas), e a representação das unidades e estruturas geológicas numa relação espacial correta (ou seja, devidamente georreferenciados) (Lillesand, T.M. [et al.], 2004e, p. 226). Para além da identificação e representação, as imagens permitem efetuar distinções importantes entre formas de relevo (*landforms*), relacionando-as com os processos geológicos que as formaram, e interpretando a história geológica da área (2004e, p. 226). Uma vez que cada tipo de rocha, cada fratura, cada elemento de erosão e deposição possuem marcas dos processos que os produziram (2004e, p. 226). Deste modo os investigadores que procuram descrever e explicar os materiais e as estruturas do relevo devem entender os seus princípios geomorfológicos e serem capazes de reconhecer a expressão dos vários materiais e estruturas. Este tipo de mapeamento exige sempre uma quantidade considerável de exploração no terreno, todavia, o processo cartográfico pode ser muito facilitado através do uso de interpretação imagem visual (2004e, p. 226).

Quando é possível identificar o que se vê nas imagens e comunicar essas informações a outros, pratica-se a interpretação da imagem. As imagens contêm dados não processados, e quando processados pelo cérebro de um intérprete humano, os dados transformam-se em informação utilizável (2004a, p. 193). As interpretações podem ocorrer em vários níveis de complexidade, desde o simples reconhecimento de objetos na superfície do terreno, até à derivação de informações detalhadas sobre as complexas interações entre as características da respetiva superfície (2004a, p. 194). O sucesso na interpretação da imagem difere de acordo com a formação e experiência do intérprete, a natureza dos objetos ou dos acontecimentos que estão a ser interpretados e a qualidade da própria imagem. Geralmente, é necessário possuir uma observação muito afinada, juntamente com imaginação e uma grande dose de paciência, assim como uma compreensão razoável do fenómeno que está a ser alvo de estudo, bem como um

conhecimento da região geográfica em que este se insere (2004a, p. 194-195).

É a partir do processo de interpretação da imagem que se inicia a vectorização, que consiste na "transformação dos dados de formato matricial para o formato vetorial" (Pina, M. [et al.], 2000, p. 88). A vectorização manual é uma técnica de vectorização da informação de forma exclusivamente manual, ou seja, consiste em percorrer o elemento a cartografar com o cursor, diretamente no monitor do computador (2000, p. 88), deste modo todos os critérios de vectorização são da responsabilidade do utilizador, que decide o que quer ou não representar.

No sentido de efetuar uma vectorização correta, é fundamental que o utilizador interprete de forma adequada os elementos apresentados na fotografia. Assim, a fotointerpretação apresenta-se como a arte de examinar as imagens dos objetos nas fotografias e de deduzir o seu significado (Dimitry, V.S. (2011), através do conhecimento de elementos de reconhecimento.

Dimitry, V.S. (2011) salienta como elementos de reconhecimento: a forma (contornos da feições do objeto que podem determinar a sua identidade), o tamanho (dimensões do objeto), a tonalidade (que se relaciona com a intensidade de energia eletromagnética refletida por um tipo de aspeto na superfície da Terra, num determinado comprimento de onda do espectro eletromagnético), a cor (uma vez que a utilização a cor facilita o processo de interpretação de fotografias e imagens), a textura (percebida por meio de micro-sombras provenientes de pequenas irregularidades na superfície[27]), a sombra (que está intrinsecamente ligada à natureza do objeto, ângulo de iluminação, perspetiva e declive da superfície do terreno), o posicionamento (alusivo à região em que a fotografia é obtida, referindo-se à posição do alvo no meio envolvente), a associação (remete para as diferentes inter-relações espaciais entre feições, geralmente devido a conexões funcionais entre os componentes em questão[28]) e por fim o padrão (ao arranjo espacial de feições em particular[29]) (2011, p. 39-43). Adicionalmente Olsen, R.C. (2007) acrescenta a elevação (que pode ser derivada a partir da sombra em imagens nadir), o sítio (relação entre o objeto e sua localização geográfica), e o tempo (relação temporal entre o objeto pode fornecer informações através de observações sequenciais).

O processo de vectorização iniciou-se com a interpretação visual dos vários elementos

[27] Para melhor compreensão a autora dá dois exemplos: a) um pavimento de boa qualidade aparece com uma textura suave porque as irregularidades são tão pequenas que não são capazes de criar sombras; b) uma floresta é caracterizada por uma textura rugosa, criada por micro-sombras das folhas e galhos (p. 41).

[28] "Um grande estacionamento lotado de veículos é associado com grandes centros comerciais ou hipermercados" (p. 43).

[29] "Exemplos típicos incluem os pomares, onde as árvores são alinhadas em filas e o posicionamento sistemático de lápides em cemitérios" (p. 43).

geológicos e geomorfológicos de acordo com as suas características. Considerando o contraste de cor face à rocha envolvente e a associação a formas lineares muito vincadas distinguiram-se inicialmente os filões. Adicionalmente, as mesmas propriedades de reconhecimento permitiram o mapeamento das descontinuidades. Este mapeamento é mais difícil que o dos filões, uma vez que o contraste da cor não é tão evidente, já que as descontinuidades possuem uma cor mais escura, uma forma mais irregular e menor comprimento e largura. Para além das propriedades de reconhecimento expostas, foi também experimentada a interpretação com mudanças na escala de observação, principalmente na interpretação dos filões e das descontinuidades, nos casos em que a sua continuidade não era percetível. Em relação aos elementos geomorfológicos, os elementos de reconhecimentos permitiram a identificação dos elementos expostos como afloramentos rochosos, a areia, caos e queda de blocos. Contudo para uma melhor interpretação do terreno o MDS criado anteriormente foi utilizado para a extração de curvas de nível com uma equidistância variada (0,5, 1 e 5 metros, com a ferramenta *Contour*, 3D *Analyst*), elaboração de perfis longitudinais (*Profile Graph*, 3D *Analyst*). A conversão das células do modelo para representação com números decimais (*Float, 3D Analyst*) possibilitaram verificar a distribuição da altitude nas classes pretendidas, através do cálculo da área.

# Capítulo 4. – Resultados

## 4.1. Esboço geológico

O granito de S. Paio forma uma massa alongada com cerca de 1 km x 0,3 km (Ribeiro, M.A. [et al.], 2014, p. 6). É um granito alcalino de grão médio a grosseiro, leucocrata, de duas micas, sintectónico, com megacristais de feldspato potássico e schlieren[30] máficos, que está em contacto com afloramentos de leucogranitos (com coloração clara) e rochas metamórficas sílico-aluminosas (migmatitos) (Araújo, M.A. and Abrunhosa, M.J., 2011, p. 59, Ribeiro, M.A. [et al.], 2014, p. 6). Uma das particularidades mais marcantes deste granito é a abundância e diversidade de xenólitos[31], nomeadamente de rochas calcossilicatadas, metagrauvaques[32], metatexitos[33] bandados, diatexitos[34] e leucogranitos (Ribeiro, M.A. [et al.], 2014, p. 7).

Os dois maciços rochosos (Alto da Mota e Alto do Facho) estão fragmentados segundo direções de fraturação bem definidas. É de assinalar a presença de outras rochas ígneas e filoneanas que cortam o maciço granítico. Alguns poderão indiciar o processo da fragmentação do supercontinente Pangeia no início do Mesozóico (Araújo, M.A., 2012). Os filões aplitopegmatíticos apresentam uma estrutura interna bem definida, geralmente com um núcleo aplítico composto por quartzo, albite, turmalina e granada, uma zona intermédia com grandes cristais de feldspato potássico, plagióclase e quartzo, e no encosto, uma zona com intercrescimentos albite/quartzo em "*comb struture*". Por vezes ocorre massa quartzosa espessa no centro do pegmatito (Ribeiro, M.A. [et al.], 2014, p. 10).

Para além do granito, numa faixa mais próxima do oceano, existem rochas metamórficas. Desse conjunto consta uma interessante variedade de migmatitos, mais ou menos foliados e com

[30] Sinónimo de migmatito heterogéneo, filões irregulares com bordas sombreadas em algumas rochas ígneas, que representam a segregação de minerais claros e escuros ou inclusões de minerais alterados, alongados por fluxo (McGraw-Hill, 2003, p.323)

[31] É um fragmento de rocha encaixante, isto é, da parede ou do teto que se encontra acidentalmente incluída numa rocha magmática (McGraw-Hill, 2003, p. 642).

[32] Arenito argiloso caracterizado por uma abundância de minerais instáveis e fragmentos de rocha, com uma matriz de argila de grão fino que liga fragmentos detríticos de maior tamanho (McGraw-Hill, 2003, p. 143)

[33] Rocha que sofreu metatexia (processo de fusão parcial ou anatexia parcial, separando-se um material fundido de composição granítica (neossoma ou leucossoma) de um resto escuro (paleossoma ou melanossoma) com minerais máficos que não sofreram fusão), apresentando duas fases rochosas: uma máfica, não fundida, e outra félsica, clara, de composição granítica, neoformada por fusão parcial aliada, geralmente, a processos metassomáticos (Winge, M., 2001) .

[34] Migmatito homogéneo, granitóide, derivado de diatexia (alto grau de anatexia) de rochas pré-existentes, sendo registados, localmente, vestígios de estruturas pré-existentes (Winge, M., 2001).

uma composição mineral bastante diversa. Apesar de não terem sido datados com precisão, sabe-se que os migmatitos são a rocha mais antiga presente na área de estudo, uma vez que são claramente anteriores ao granito hercínico (Araújo, M.A., 2012).

As rochas sedimentares presentes no S. Paio são as mais recentes, do período Quaternário (Araújo, M.A., 2012). A sequência sedimentar existente revela parte da história da evolução geomorfológica que se seguiu ao último período interglaciar, que ocorreu há cerca de 125 000 anos (Araújo, M.A.).

A sequência mais completa apresenta a base a 5 metros de altitude e inicia-se por um depósito marinho correspondente ao último interglaciar (1) assente sobre a rocha granítica. Na classificação dos depósitos marinhos fósseis de Araújo, M.A. (1991) o depósito é inserido no nível III, cujas características são: presença a cotas geralmente inferiores a 10 metros, *bed-rock* ligeiramente ferruginizado, valores de arredondamento médio das areias (RM) bastante elevados e uma frequência elevada de grãos brilhantes, o que sugere uma origem marinha. Assente no depósito marinho (1) é definido um primeiro depósito solifluxivo com pedacinhos de carvão (2) que poderá estar relacionado com um clima frio e húmido (Araújo, M.A., 1991, p. 372). Seguidamente encontra-se um depósito eólico consolidado (3), que poderá estar inserido num período de clima possivelmente frio e seco (Araújo, M.A.). O segundo depósito solifluxivo (4) é caracterizado, essencialmente, pela formação areno-pelítica de cobertura, cujo desenvolvimento se relaciona com um clima frio e húmido (Araújo, M.A., 1991, p. 457) .

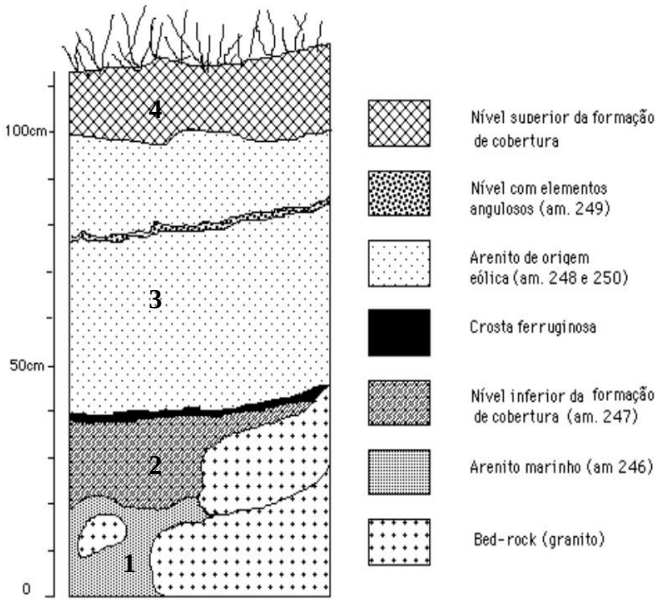



*Figura* 32. *Sequência estratigráfica do corte de S. Paio, altitude da base 5m. Fonte: Araújo, M.A. (1991).*

Observando a Figura 33, é possível verificar que existem filões com duas direções dominantes, NW-SE e NNW-SSE. Alguns filões estão rejeitados por desligamentos ou afloram de maneira descontínua (Figura 34, B). Os desligamentos que afetam os filões aparentam ter uma movimentação para a direita. Na Figura 33 observa-se que o padrão de fracturação, construído a

partir do mapeamento das descontinuidades, revela duas orientações predominantes, NNW-SSE e NE-SW.

A resolução de 2 centímetros de píxel possibilita a identificação das descontinuidades mais pequenas, assim como dos filões. Porém, a grande resolução e a vantagem de poder incrementar-se o *zoom* da imagem, por vezes, transforma-se numa dificuldade, uma vez que é frequente perder-se a noção do espaço e do que se está a cartografar.

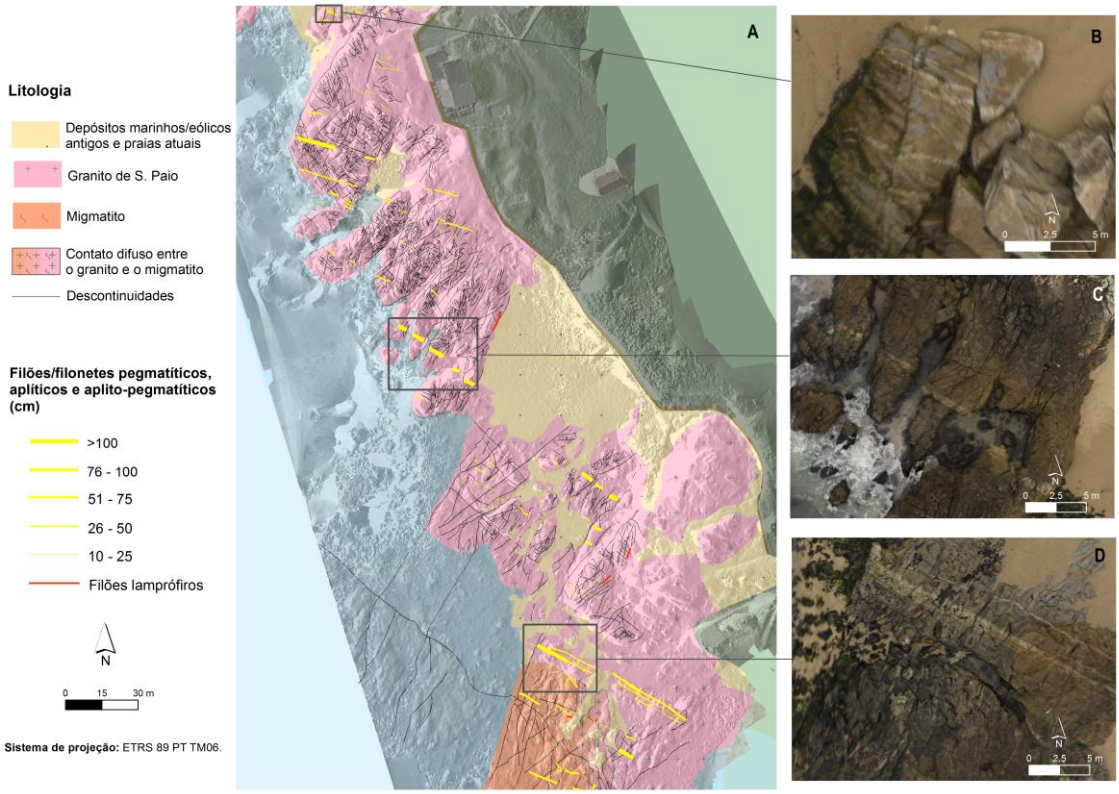



*Figura 33. A. Esboço geológico da área costeira de S. Paio; Detalhes no ortofotomapa: B. Pormenor dos blocos rochosos situados no setor norte; C. Detalhe de um filão com uma espessura que varia entre 130 e 180 cm; D. Contacto litológico entre a rocha ígnea e a rocha metamórfica e detalhe dos filões.*

*Figura 34. Diferentes litologias da área de estudo. A) Descontinuidades do granito de S. Paio; B) Cisalhamento direito (filão rejeitado); C) Filonetes; D) Contacto entre migmatito e o granito; E) Migmatito; F) Filão de lamprófiro.*

## 4.2 Esboço geomorfológico

A área total cartografada coberta pelo voo realizado em agosto é de cerca 75 000m$^2$, sendo que uma parte significativa está coberta pelo oceano. O MDS criado tem uma amplitude de -14m até 20m. Assim, os valores do MDS (Figura 35) considerados para análise centram-se entre os -5m até 20m de altitude, perfazendo uma área de 73 500m$^2$. A primeira classe, a mais baixa (>0) é a que apresenta maior superfície de ocupação (superior a 35 000m$^2$), uma vez que incorpora uma extensa área oceânica. As áreas com altitudes mais elevadas são menos frequentes e representadas, sobretudo, pelos afloramentos graníticos.

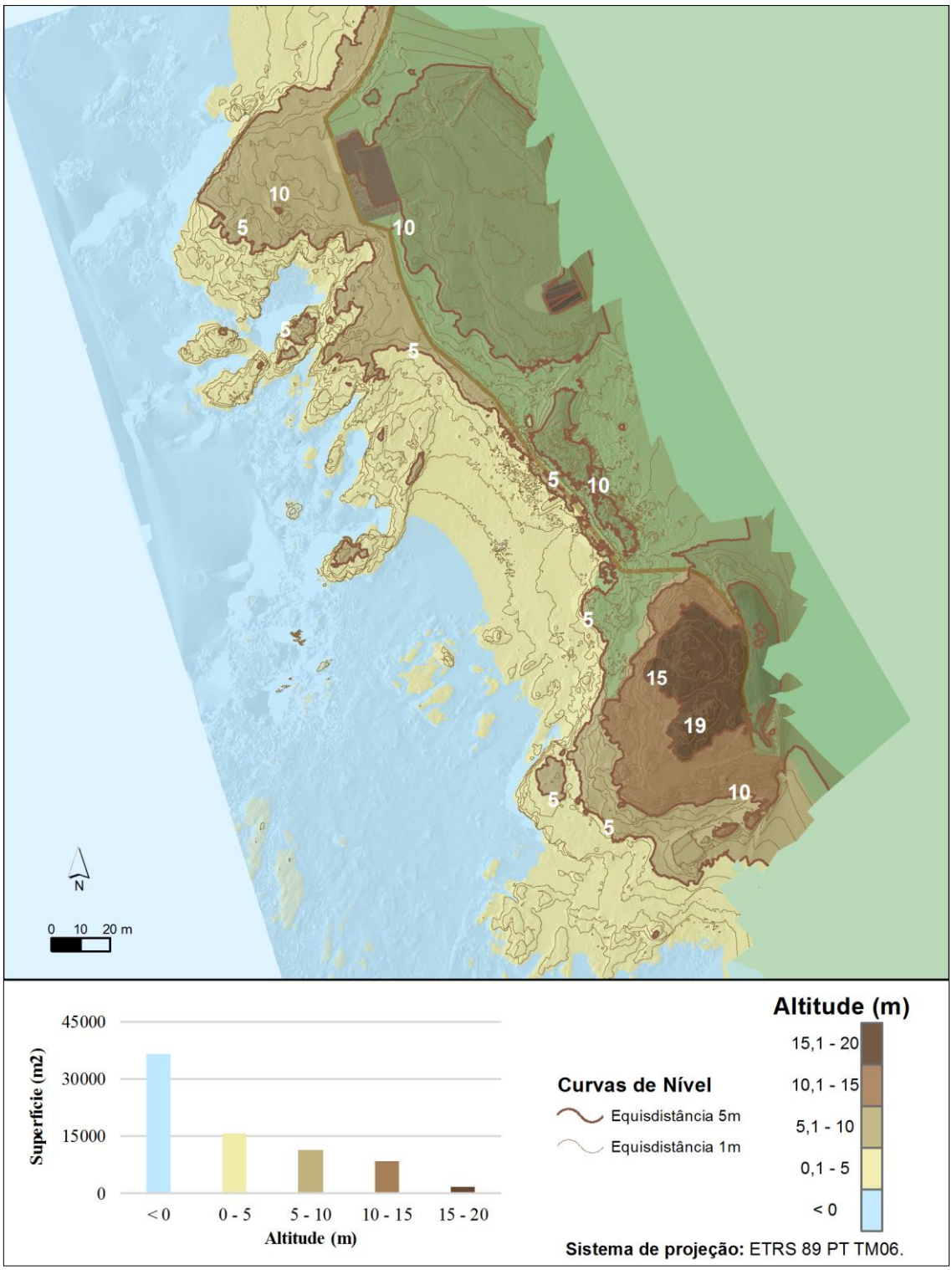



*Figura 35. Modelo Digital de Superfície da área de estudo.*

Através do MDS criado foram extraídos perfis longitudinais que representam a variação altimétrica da superfície cartografada. A concretização desta tarefa conduziu à distinção de quatro setores geomorfologicamente distintos, tendo em conta a amplitude das altitudes observadas (Figura 36, Perfil 3).

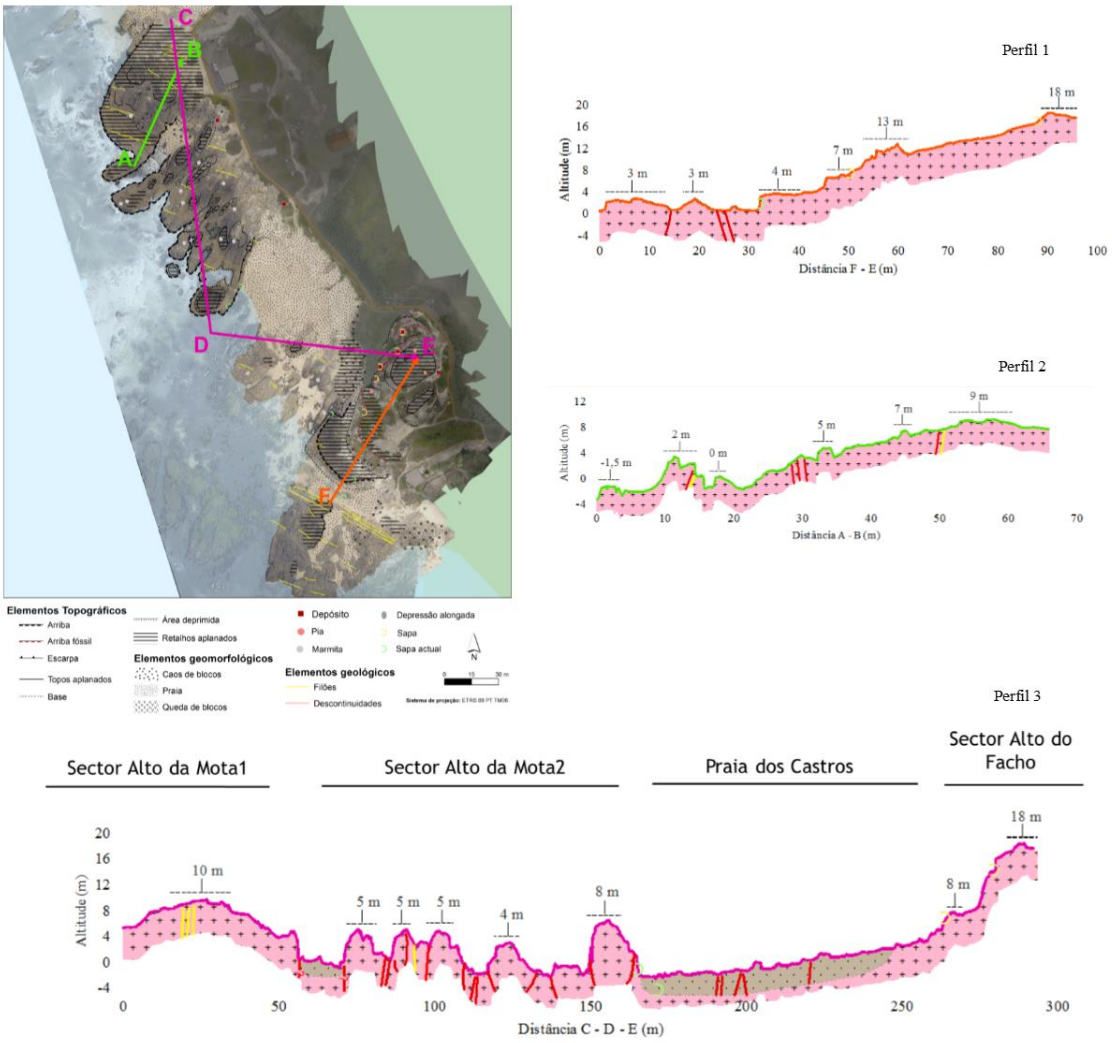



*Figura 36. Perfis longitudinais da área de estudo, elaborados a partir do MDS.*

O primeiro setor, designado por Alto da Mota1 (Figura 36, Perfil 1), consiste num maciço granítico pouco fraturado caracterizando-se essencialmente pela presença uma superfície aplanada a uma cota de 9 - 10 metros. Na área mais ocidental deste setor, por estar mais exposta à ação do mar as cotas são mais baixas e o relevo apresenta um aspeto mais irregular (0-2m).

A separar os setores Alto da Mota1 e Alto da Mota2 encontra-se uma pequena praia encastrada (cf. Figura 38, A).

O setor Alto da Mota2 aparenta estar muito fraturado. É composto por pequenos

promontórios, com uma topografia irregular. Verifica-se que é mais baixo que o setor anterior, e assim está numa posição mais vulnerável à ação da salsugem. Assinala-se uma grande concentração de depressões alongadas, orientadas pela rede de fracturação, resultado da meteorização do granito pela exploração das fraturas da rocha. Este setor apresenta dois restos de depósitos: a sequência de depósitos já exposta (cf. Figura 32) com base a 5 metros, no limite com a praia dos Castros, e um pequeno afloramento testemunho de uma plataforma de erosão marinha mais alta a 6-7metros no seu flanco norte (a sul da praia encastrada) que poderá corresponder à mesma plataforma da base em que assentam os depósitos descritos, embora se situe a uma cota diferente (Figura 32). Adicionalmente, no promontório mais a sul, é visível uma sapa que se desenvolve segundo uma rampa subindo suavemente para o interior e que corresponde à ação atual do mar (Figura 38).

A praia dos Castros que está resguardada pelos dois afloramentos graníticos consiste no terceiro setor identificado. É a área mais deprimida e está geralmente coberta por areia. São visíveis alguns afloramentos do substrato rochoso, sobretudo no seu sector ocidental.

Por fim o quarto setor que corresponde ao Alto do Facho, onde se encontra o vértice geodésico (Figura 36, Perfil 2). Este setor é o menos compartimentado em comparação com os dois setores graníticos anteriormente apresentados. O seu topo é composto por uma superfície aplanada, bem conservada, que culmina ligeiramente acima de 20metros. Em direção ao mar desenvolve-se uma escadaria em que alternam setores relativamente aplanados e setores abruptos, terminando com uma descida abrupta para o nível médio das águas do mar. Este setor incorpora sapas atuais e fósseis, a várias cotas (próximas dos 0m e entre os 7 e os 10 metros), as quais representam testemunhos das variações do nível das águas do mar. Para além disso, no seu topo existem várias pias[35](Figura 38).

O escalonamento de restos de depósitos e superfícies aplanadas sugere uma origem tectono-eustática, em que as variações do nível do mar podem ter interagido com uma eventual subida de conjunto do Alto do Facho, que aparece limitado por escarpas bastante abruptas (Araújo, M.A. and Abrunhosa, M.J., 2012).

Adicionalmente, com a elaboração dos perfis, foram também identificados retalhos aplanados que poderão relacionar-se com o estacionamento do nível do mar durante o Quaternário. Tratando-se possivelmente de um sector em soerguimento (Araújo, M.A. and Abrunhosa, M.J.,

[35] Depressões que aparecem no topo de algumas superfícies graníticas, geralmente mais largas do que fundas. Ao contrário das marmitas, claramente ligadas à abrasão marinha, as pias são devidas a fenómenos de meteorização física/química e não implicam, por isso, uma presença recente da ação marinha.

2012) é provável que estes restos de antigas plataformas de erosão marinha ocorram a altitudes diferentes nos sectores que aparentam ter sido deslocados de forma mais ou menos intensa.

O setor do Alto do Facho é aquele onde os restos de plataformas (cf. Perfil B, Figura 36) são mais evidentes. Observando a Figura 37 verifica-se que existe uma superfície culminante acima dos 20 metros. Um pouco abaixo dessa superfície existe um depósito marinho a uma cota de 19m. Este depósito parece estar relacionado com o topo aplanado, onde se situa a base vértice geodésico (também a 19m). Para além disso, desenvolvem-se mais duas plataformas (a 15 e 5 metros), separadas por desníveis abruptos.

*Figura 37. Perfil esquemático do setor Alto do Facho.*

A comparação da topografia do Alto da Mota e do Alto do Facho permite verificar que os seus topos se situam a altitudes diferentes. Só no Alto do Facho é possível encontrar um escalonamento claro. Este escalonamento do Alto do Facho pode ficar a dever-se à conjugação de dois efeitos: um levantamento de conjunto combinado com as variações do nível do mar durante o Quaternário.

É necessário, todavia, um trabalho ainda mais aprofundado para que seja possível comparar os dois morros, alto da Mota e alto do Facho e compreender as causas das diferenças que eles evidenciam.

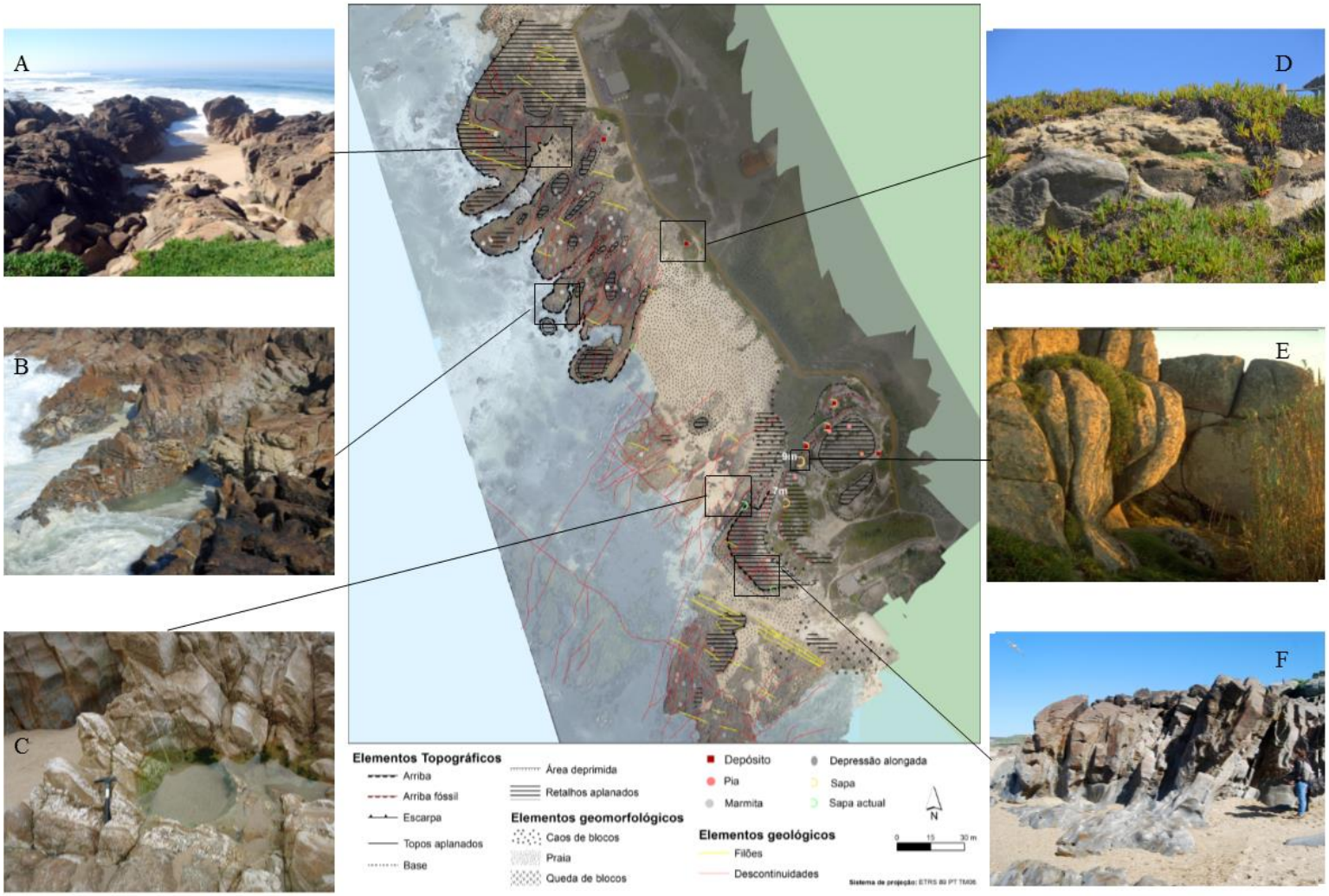



*Figura 38. Esboço geomorfológico. A) Praia encastrada; B) Promontórios do setor 2 do Alto da Mota; C) Marmita; D) Sequência estratigráfica (cf. Figura 32); E) Sapa fóssil; F) Sapa e plataforma de erosão marinhas atuais.*

# Conclusão e perspetivas futuras

Grande parte dos litorais do globo são constituídos por costas rochosas, contudo, o seu estudo é menos frequente quando comparado com as costas arenosas. Apesar da sua recente proliferação, os VANTs ainda não são muito utilizados no estudo das costas rochosas. No entanto, a elaboração deste projeto mostra que esta nova ferramenta de aquisição de dados aerofotogramétricos tem um elevado potencial para os estudos de Geomorfologia do Litoral.

Uma das grandes vantagens reside no facto que os dados recolhidos durante um voo, podem ser vistos e processados no próprio local, o que permite verificar se os critérios estabelecidos (como área do voo abrangida, qualidade das imagens…) foram alcançados. Caso contrário, o voo pode repetir-se no imediato, reunindo as mesmas condições que o voo anterior (no caso em estudo, marés baixas vivas, e condições meteorológicas favoráveis). Daqui advém um grande benefício, uma vez que o tempo para obtenção dos dados se prende sobretudo com o seu tempo de processamento no *software Agisoft Photoscan.* Este programa é *user-friendly*, tem quatro etapas fundamentais, a sua utilização é simples e praticamente automática. O tempo de processamento varia, dependendo das características do computador que se está a utilizar, do número de fotografias, dos critérios que se estabelecem ao longo das etapas do processo, podendo demorar uns minutos ou várias horas. Complementarmente, ao programa devem ser adicionados pontos de controlo (recolhidos com o GPS) o que permite que os dados processados já estejam devidamente georreferenciados.

Os dados derivados, ortofotomapa e modelo digital de superfície, são de grande qualidade, uma vez que dada a sua resolução (1,8 e 3cm, respetivamente) possibilitam a diferenciação e interpretação de vários elementos existentes à superfície, o que facilita a elaboração de cartografia de grande detalhe e com rigor altimétrico. Foi assim que na área de estudo foram cartografados filões e descontinuidades que permitiram a distinção de um padrão de fracturação nos dois afloramentos graníticos. Relativamente à Geomorfologia, foram identificadas marmitas litorais, depressões alongadas, pias e retalhos de superfícies aplanadas. Estes dados permitiram a divisão de quatro setores geomorfológicos, mediante a realização de perfis longitudinais que ilustram a variação altimétrica da superfície. Para além disso, foram cartografadas diferentes litologias, assim como sapas fósseis e atuais, e depósitos sedimentares que testemunham a evolução geomorfológica durante o Quaternário recente. Apesar de se terem registado avanços positivos no estudo da Geomorfologia da costa de S. Paio, existem novas linhas de investigação a considerar (como a cartografia da mobilidade de blocos rochosos), bem como o aperfeiçoamento da

definição e cartografia dos retalhos aplanados/plataformas de erosão marinha, que permita uma melhor compreensão das diferenças entre os dois afloramentos graníticos.

Atendendo às características e face à melhoria da interpretação geológica e geomorfológica do setor do S. Paio que se obteve com estes novos dados, assume-se que a aquisição de dados com os VANTs e a utilização do *Agisoft Photoscan* constituem técnicas importantes nos estudos das costas rochosas.

Todavia, a utilização dos VANTs pode ainda ser expandida a outros temas, tais como cartografia de risco, dada a facilidade de repetição dos voos e a relativa rapidez no processamento de dados, tornando-a uma ferramenta acessível e muito eficaz na monitorização e gestão do território.

# Referências bibliográficas


Agarwal, S.; Furukawa, Y.; Snavely, N.; Curless, B.; Seitz, S. M.; Szeliski, R. - Reconstructing rome. *Computer*. n.º 6 (2010). p. 40-47. 0018-9162

Agisoft, LLC - First run tutorial: Orthophoto and DEM Generation with Agisoft PhotoScan Pro 1.0.0 (with out Ground Control Points). Disponível em WWW: <http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.0.0%20-Tutorial%20(BL)%20-%20Orthophoto,%20DEM%20(without%20GCP).pdf>.

Agisoft, LLC - Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.0.0. (2013). Disponível em WWW: <http://fieldofviewllc.com/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/27_AGISOFT%20PHOTOSCAN%20PRO%20USER%20GUIDE.PDF>.

Agisoft, LLC - PhotoScan. 2014. Disponível em WWW: <http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_presentation.pdf>.

Aguilar, Manuel A.; Aguilar, Fernando J.; Agüera, Francisco - Mapping small areas using a low-cost close range photogrammetric software package with aerial photography. *The Photogrammetric Record*. Vol. 20. n.º 112 (2005). p. 335-350. Disponível em WWW: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-9730.2005.00331.x>. 1477-9730

Almeida, P. B. - O Castro de S. Paio (Labruge, Vila do Conde). 2012. 1 - Arqueologia. 978-972-9453-95-3

Almeida, P. B.; Araújo, M. A.; Ferreira, J.; Cruz, V. - O Castro de S. Paio (Labruge, Vila do Conde). 2012. - Introdução. 978-972-9453-95-3

Araújo, M. A. - Alguns aspectos geomorfológicos da área do S. Paio (Labruge, Vila do Conde). Disponível em WWW: <http://web.letras.up.pt/asaraujo/Trabalhos/37%20SPaio%20parque%20biologico.pdf>.

Araújo, M. A. - Geomorfologia Litoral Disponível em WWW: <http://web.letras.up.pt/asaraujo/seminario/programa.html>.

Araújo, M. A. - Evolução Geomorfológica da Plataforma Litoral da Região do Porto. Porto: Universidade do Porto, 1991. Disponível em WWW: <http://web.letras.up.pt/asaraujo/Trabalhos/09%20tese%20com%20fotos%20protegida.pdf>.

Araújo, M. A. - Geografia Física de Portugal (1ª Parte). 2002. Disponível em WWW: <http://web.letras.up.pt/asaraujo/geofis/t1.pdf>.

Araújo, M. A. - O Castro de S. Paio (Labruge, Vila do Conde). 2012. 2 - Geologia. 978-972-9453-95-3

Araújo, M. A.; Abrunhosa, M. J. - Aspetos geológicos e geomorfológicos da orla costeira de Labruge (Vila do Conde, NW de Portugal). Faculdade de Letras Universidade de Coimbra: 2011.

Araújo, M. A.; Teixeira, J.; Marques, M. - A área do S. Paio (Labruge, Vila do Conde): desafios científicos e uso de novas tecnologias. Guimarães: 2014.

Araújo, M.A. ; Abrunhosa, M. J. - Structural evidence of recent uplift at a small coastal area (S. Paio , Vila do Conde, NW Portugal). Cologne: 2012.

Campbell, J.B.; Wynne, R.H. - Introduction to Remote Sensing. Guilford Press, 2011. Disponível em WWW: <https://books.google.pt/books?id=zgQDZEya6foC>.Cap. 1 - History and Scope of Remote Sensing. 9781609181765

Carríngton da Costa, J.; Teixeira, C. - Notícia Explicativa da folha 9C- Porto. 1957.

Dalamagkidis, K. - Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer Netherlands, 2014. 1 - Aviation History and Unmanned Flight 9789048197064

Diário da República, 2.ª série — N.º 197 — 12 de Outubro de 2009 - Regulamento Metropolitano da Paisagem Protegida Regional do Litoral de Vila do Conde e Reserva Ornitológica de

Mindelo. Disponível em WWW: <https://dre.pt/application/dir/pdf2sdip/2009/10/197000000/4121941221.pdf>.
Dias, Rui; Ribeiro, A. - Geologia de Portugal, Volume I, Geologia Pré-mesozóica de Portugal. 2013. - O Varisco do sector Norte de Portugal.
Dimitry, V. S. - Fotointerpretação. : Universidade Federal De Santa Maria 2011.
Duan, H.; Li, P. - Bio-inspired Computation in Unmanned Aerial Vehicles. Springer, 2014. Disponível em WWW: <https://books.google.pt/books?id=RoPEBAAAQBAJ>.Cap. - 1. Introduction. 9783642411960
Eisenbeiß, H. - UAV photogrammetry. ETH Zurich, Switzerland:, 2009. 3906467864
Everaerts, J - The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 37. (2008). p. 1187-1192.
Falcão, I. O. - Extracção semi-automática tridimensional dos principais elementos de um perfil rodoviário a partir de dados LiDAR. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2012. Disponível em WWW: <http://enggeoespacial.fc.ul.pt/ficheiros/teses/tese_ines_falcao.pdf>.
Ferreira, A. M. P. J. - Dados geoquímicos de base de sedimentos fluviais de amostragem de baixa densidade de Portugal Continental: Estudo de factores de variação regional. (2000).
Fonseca, J. - Dicionário do Nome das Terras. Círculo de Leitores, 2006. 9724237915
Fonstad, M. A.; Dietrich, J. T.; Courville, B. C.; Jensen, J. L.; Carbonneau, P. E. - Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 38. n.º 4 (2013). p. 421-430. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000316573700009>. 0197-9337
Gómez-Pujol, Lluís; Pérez-Alberti, Augusto; Blanco-Chao, Ramón; Costa, Stéphane; Neves, Mario; Río, Laura Del - The rock coast of continental Europe in the Atlantic. 2014.
Hevia, I.M. - Geología de España: una historia de seiscientos millones años. Rueda, 2004. Disponível em WWW: <http://books.google.pt/books?id=3BpPAQAAIAAJ>. 9788472071445
Humphrey, D. - UAV and GIS An Emerging Dynamic Duo. 2014. Disponível em WWW: <http://www.esri.com/~/media/Files/Pdfs/news/arcuser/0314/uav-and-gis.pdf>.
Hutchinson, M. F.; Gallant, J.C. - Terrain Analysis: Principles and Applications. Wiley, 2000. Disponível em WWW: <https://books.google.pt/books?id=1311_4-zvy4C>.Cap. 2 - Digital Elevation Models and Representation of Terrain Shape. 9780471321880
Jordan, B. R. - A bird's-eye view of geology: The use of micro drones/UAVs in geologic fieldwork and education. *GSA Today*. Vol. 25. n.º 7 (2015). p. 50-52. Disponível em WWW:.
Langley, R. B. - Dilution of precision. *GPS world*. Vol. 10. n.º 5 (1999). p. 52-59.
Legarreta, P.; Pirola, Al. - Drones una oportunidad para la industria. *Petrotecnia*. (2015). p. 70-81. Disponível em WWW: <http://www.petrotecnia.com.ar/3-2015/PdfsSinPublicidad/Drones_Legarreta.pdf>.
Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W.; Chipman, J. M. - Remote Sensing And Image Interpretation, 5Th Ed. Jonh Wiley & Sons, 2004a. 3 - Basic Principles of Photogrammetry. 0-471-15227-7
Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W.; Chipman, J. M. - Remote Sensing And Image Interpretation, 5Th Ed. Jonh Wiley & Sons, 2004b. 1 - Concepts and Foundations of Remote Sensing 0-471-15227-7
Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W.; Chipman, J. M. - Remote Sensing And Image Interpretation, 5Th Ed. Jonh Wiley & Sons, 2004c. 7 - Digital Image Processing. 0-471-15227-7
Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W.; Chipman, J. M. - Remote Sensing And Image Interpretation, 5Th Ed. Jonh Wiley & Sons, 2004d. 2 - Elements of Photographic Systems. 0-471-15227-7
Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W.; Chipman, J. M. - Remote Sensing And Image Interpretation, 5Th

Ed. Jonh Wiley & Sons, 2004e. 4 - Introduction to Visual Image Interpretation. 0-471-15227-7

LUSA - Europa quer separar drones em categorias e legislar a utilização. 2015. Disponível em WWW: <http://pt.noticias.voxquo.com/noticia-detalhe-media.asp?id=1618091&t=Europa-quer-separar-drones-em-categorias-e-legislar-a-utiliza%E7%E3o>.

Martínez-del-Pozo, José-Ángel; Mayoral-Herrera, Victorino; Ortiz-Coder, Pedro - Good Practice in Archaeological Diagnostics. Springer, 2013. - Creating and Analysing Digital Terrain Models for Archaeological Research. 3319017837

Maune, D.F.; Koop, S. M.; Crawford, C. A.; Zervas, C. E. - Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2001. 1 - Introduction.

Micheletti, Natan; Chandler, Jim H.; Lane, Stuart N. - Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms*. (2014). p. n/a-n/a. Disponível em WWW: <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3648>. 1096-9837

Miranda, M. - Drones – Uma nova realidade no espaço aéreo português. Drone Club de Portugal, 2014. Disponível em WWW: <http://www.droneclub.pt/servicos/25-drones-uma-nova-realidade-no-espaco-aereo-portugues>.

Naylor, L. A.; Stephenson, W. J.; Trenhaile, A. S. - Rock coast geomorphology: Recent advances and future research directions. *Geomorphology*. Vol. 114. n.º 1-2 (2010). p. 3-11. Disponível em WWW: <<Go to ISI>://WOS:000272876200002>. 0169-555X

Neitzel, Frank; Klonowski, J - Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*. Vol. 38. (2011). p. 1-6.

Neto, M. S. - Drones e Agricultura: Como garantir a qualidade do mapeamento aéreo com Drones? 2014. Disponível em WWW: <http://droneng.com.br/drones-e-agricultura-como-garantir-qualidade-mapeamento-aereo-com-drones/>.

Olsen, R.C. - Remote Sensing from Air and Space. Society of Photo Optical, 2007. Disponível em WWW: <https://books.google.pt/books?id=887dWbdO7FYC>. 9780819462350

Pavlopoulos, Kosmas; Evelpidou, Niki; Vassilopoulos, Andreas - Mapping geomorphological environments. Springer Science & Business Media, 2009. 3 - Coastal environments. 3642019501

Pérez-Estaún, A.; Bea, F.; Bastida, F.; Marcos, F.; Martínez Catalán, J.R.; Martínez Poyatos, D.; Arenas, R.; Díaz Garcia, F.; Azor, A.; Simancas, J.; Gonzalez, F. - Geologia de España. 2004. - La cordillera Varisca Europea: El Macizo Ibérico. 84-7840-546-1

Pérez-Alberti, A.; Trenhaile, A. S. - An initial evaluation of drone-based monitoring of boulder beaches in Galicia, north-western Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 40. n.º 1 (2015). p. 105-111. 1096-9837

Pethick, J. S.; Crooks, S. - Development of a coastal vulnerability index: a geomorphological perspective. *Environmental Conservation*. Vol. 27. n.º 4 (2000). p. 359-367. 0376-8929

Pina, M.; Santos, S.; Carvalho, M. S. - Conceitos básicos de Sistemas de Informação Geográfica e Cartografia aplicados à saúde. (2000). p. 122.

Pinho, R. - Aplicação técnicas de detecção remota para a identificação de lineamentos estruturais num sector no noroeste de Portugal e sudoeste da Galiza. Porto: Universidade do Porto, 2009.

Ramsey, C. L.; Griffiths, P. A.; Stokes, T. R. - Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicles (Uavs) and High- resolution Compact Digital Cameras: A Promising New Method For Monitoring Changes To Surface Karst Resources. *Acta Carsologica*. Vol. 43/2-3. (2014).

p. 269-286. Disponível em WWW: <http://www.karstportal.org/FileStorage/Acta_Carsologica/43_2-3/625-4307-2-PB.pdf>.
Rees, W.G. - Physical Principles of Remote Sensing. Cambridge University Press, 2001. Disponível em WWW: <https://books.google.pt/books?id=u17Zv45DENoC>. 9780521669481
Remondino, Fabio; Barazzetti, L; Nex, Francesco; Scaioni, Marco; Sarazzi, Daniele - UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling–current status and future perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 38. n.º 1 (2011). p. C22.
Ribeiro, A. - Geologia de Portugal, Volume I, Geologia Pré-mesozóica de Portugal. 2013. - A Evolução Geodinâmica de Portugal; Uma introdução.
Ribeiro, M. A.; Almeida, A.; Dória, A.; Noronha, F.; Brites, H.; Sant'Ovaia, H.; Ferreira, J.; Areias, M.; Sousa, M. - Granitos e migmatitos no maciço Póvoa de Varzim-Porto: Implicações geodinâmicas. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, Portugal: 2014.
Sabins, F.F. - Remote Sensing: Principles and Applications, Third Edition. Waveland Press, 2007. Disponível em WWW: <https://books.google.pt/books?id=nVgfAAAAQBAJ>. 9781478610083
Scheffers, A.M.; Scheffers, S.R.; Kelletat, D.H. - The Coastlines of the World with Google Earth: Understanding our Environment. Springer Netherlands, 2012. 2 - Coastal Landforms and Landscapes. 9789400707382
Sunamura, T. - Geomorphology of rocky coasts. J. Wiley, 1992a. 9780471917755
Sunamura, T. - Geomorphology of rocky coasts. J. Wiley, 1992b. 1 - Introduction. 9780471917755
Sunamura, T. - Geomorphology of rocky coasts. J. Wiley, 1992c. 2 - Nearshore wave field. 9780471917755
Sunamura, T. - Geomorphology of rocky coasts. J. Wiley, 1992d. 5 - Processes of cliff erosion. 9780471917755
Sunamura, T. - Geomorphology of rocky coasts. J. Wiley, 1992e. 7 - Shore Platforms. 9780471917755
Sunamura, T. - Geomorphology of rocky coasts. J. Wiley, 1992f. 8 - Some characteristic erosional landforms. 9780471917755
Trenhaile, A. S. - Encyclopedia of Coastal Science. Springer, 2006. Disponível em WWW: <http://books.google.pt/books?id=VWnxpAxp6TMC>.Cap. - Rock Coast Processes. 9781402038808
Valavanis, K.P.; Vachtsevanos, G.J. - Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer Netherlands, 2014. 1 - Introduction. 9789048197064
Van Sickle, J. - GPS for Land Surveyors Third Edition. CRC Press, 2008. 3 - The Framework. 9780203305225
Verhoeven, Geert - Taking computer vision aloft–archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan. *Archaeological Prospection*. Vol. 18. n.º 1 (2011). p. 67-73. 1099-0763
Verhoeven, Geert; Sevara, Christopher; Karel, Wilfried; Ressl, Camillo; Doneus, Michael; Briese, Christian - Good Practice in Archaeological Diagnostics. Springer, 2013. 3 - Undistorting the past: new techniques for orthorectification of archaeological aerial frame imagery. 3319017837
Vidal, A. - Extração e avaliação de geoinformação pelo uso de imagens adquiridas por veículos aéreos não tripulados. Faculdade de Ciências Universidade do Porto, 2013.
Weibel, R.; Heller, M. - Geographical Information Systems: Principles and Applications. London: Longman, 1991. 19 - Digital Terrain Modeling.

Westoby, M. J.; Brasington, J.; Glasser, N. F.; Hambrey, M. J.; Reynolds, J. M. - 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*. Vol. 179. n.º 0 (2012). p. 300-314. Disponível em WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12004217>. 0169-555X

Winge, M. - Glossário Geológico Ilustrado. 2001. Disponível em WWW: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>.

# Anexos:

# Anexo 1: Quadros síntese do Estado da Arte

*Quadro 2. Artigos da Geomorphology sobre costas rochosas (12 agosto 2015).*

| | Título | Autores | Ano | Keywords | Tema |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | Clast mobility within boulder beaches over two winters in Galicia, northwestern Spain | Augusto Pérez-Alberti<br>Alan S. Trenhaile | 2015 | Movimentação de blocos; GIS | Geomor-fologia |
| **2** | The genesis of solution pipes: Evidence from the Middle–Late Pleistocene Bridgewater Formation calcarenite, southeastern Australia | Matej Lipar<br>John A. Webba<br>Susan Q. White<br>Ken G. Grimes | 2015 | Formações cársicas | Geomor-fologia |
| **3** | Main factors determining bioerosion patterns on rocky cliffs in a drowned valley estuary in the Colombian Pacific (Eastern Tropical Pacific) | Alba Marina Cobo-Vivero<br>Jaime Ricardo Cantera-Kintz | 2015 | Bioerosão; distribuição de tamanho de rocha; arriba rochosa | Erosão |
| **4** | A recursion model to calculate the original widths of narrow terraces and their backwearing rates in a coastal area subjected to regular uplift during the late Holocene | S. Uesawa<br>A. Miyakawa | 2015 | Modelo de recursão; Taxa de erosão horizontal (backwearing) | Erosão |
| **5** | Retreat rates, modalities and agents responsible for erosion along the coastal chalk cliffs of Upper Normandy: The contribution of terrestrial laser scanning | Pauline Letortu<br>Stéphane Costa<br>Olivier Maquaire<br>Christophe Delacourt<br>Emmanuel Augereau<br>Robert Davidson<br>Serge Suanez<br>Jean Nabucet | 2015 | Taxas e modalidades de recuo; Erosão; Deteção Remota - TLS | Erosão |
| **6** | Longshore variability of beach states and bar types in a microtidal, storm-influenced, low-energy environment | N. Aleman<br>N. Robin<br>R. Certain<br>E.J. Anthony<br>J.-P. Barusseau | 2015 | Estado da praia; Geologia; DR- LiDAR | Geomor-fologia |
| **7** | Holocene coastal notches in the Mediterranean region: Indicators of palaeoseismic clustering? | S.J. Boulton<br>I.S. Stewart | 2015 | Bioerosão; Notches; Neotectónica | Erosão |
| **8** | A simple model to estimate the impact of sea-level rise on platform beaches | Rui Taborda<br>Mónica Afonso Ribeiro | 2015 | Erosão Costeira; Aumento do NMM; Plataforma | Erosão |
| **9** | Uplifted flank margin caves in telogenetic limestones in the Gulf of Orosei (Central-East Sardinia—Italy) and their palaeogeographic significance | Ilenia Maria D'Angeli<br>Laura Sanna<br>Claudio Calzoni<br>Jo De Waele | 2015 | Grutas costeiras; Corrosão; sobrelevação (highstands) do nível do mar | Tectónica |

| | Título | Autores | Ano | Keywords | Tema |
|---|---|---|---|---|---|
| **10** | Measurement of historical cliff-top changes and estimation of future trends using GIS data between Bridlington and Hornsea – Holderness Coast (UK) | Ricardo Castedo<br>Rogelio de la Vega-Panizo<br>Marta Fernández-Hernández<br>Carlos Paredes | 2015 | Evolução da linha de costa; GIS; Modelação de recessão | Erosão |
| **11** | Recent deep-seated coastal landsliding at San Onofre State Beach, California | Adam P. Young | 2015 | Movimentos de vertente no mar; Arriba/ Falésia; Erosão costeira; | Erosão |
| **12** | Advantages of beachrock slabs for interpreting high-energy wave transport: Evidence from Ludao Island in south-eastern Taiwan | A.Y. Annie Lau<br>James P. Terry<br>Adam D. Switzer<br>Jeremy Pile | 2015 | Transporte de blocos; Onda de tempestade; Equações hidrodinâmicas; Geomorfologia do litoral | Geomor-fologia |
| **13** | Role of wave forcing, storms and NAO in outer bar dynamics on a high-energy, macro-tidal beach | Gerd Masselink<br>Martin Austin<br>Tim Scott<br>Tim Poate<br>Paul Russell | 2014 | Praia encastrada; Classificação das praias; Tempestades | Geomor-fologia |
| **14** | Modelling tidal notch formation by wetting and drying and salt weathering | Alan S. Trenhaile | 2014 | Notches; Modelação; Nível do mar | Erosão |
| **15** | Beach development on an uplifted coral atoll: Niue, south west Pacific | Teuvirihei Helene Marsters<br>David M. Kennedy | 2014 | Praia; Plataforma; Rampa de abrasão | Geomor-fologia |
| **16** | Post-Roman sea-level changes on Pag Island (Adriatic Sea): Dating Croatia's “enigmatic” coastal notch? | Nick Marriner<br>Christophe Morhange<br>Sanja Faivre<br>Clément Flaux<br>Matteo Vacchi<br>Slobodan Miko<br>Vincent Dumas<br>Giulia Boetto<br>Irena Radic Rossi | 2014 | Notches; Nível do mar no Holocénico | Tectónica |
| **17** | Tectonic constraints on the late Pleistocene-Holocene relative sea-level change along the north-eastern Adriatic coast (Croatia) | Maša Surić<br>Tvrtko Korbar<br>Mladen Juračić | 2014 | Mudança relativa do nível do mar; Tectónica | Tectónica |

| | Título | Autores | Ano | Keywords | Tema |
|---|---|---|---|---|---|
| **18** | The unsteady nature of sea cliff retreat due to mechanical abrasion, failure and comminution feedbacks | Shaun W. Kline<br>Peter N. Adams<br>Patrick W. Limber | 2014 | Recuo da arriba; Abrasão mecânica; Modelação número rica | Erosão |
| **19** | Controls on macrotidal rip current circulation and hazard | Tim Scott<br>Gerd Masselink<br>Martin J. Austin<br>Paul Russell | 2014 | Correntes de retorno; Morfodinâmica de praia; Perigo; Segurança | Geomor-fologia |
| **20** | Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning: A case study of Rügen, Germany | Dirk Kuhn<br>Steffen Prüfer | 2014 | Monitorização de deslizamentos de terra; Recuo da arriba; TLS | Geomor-fologia |
| **21** | Late Quaternary uplift rate inferred from marine terraces, Shimokita Peninsula, northeastern Japan: A preliminary investigation of the buried shoreline angle | Tabito Matsu'ura<br>Haruo Kimura<br>Junko Komatsubara<br>Norihisa Goto<br>Makoto Yanagida<br>Kiyoshi Ichikawa<br>Akira Furusawa | 2014 | Quaternário; Terraço marinho; Taxa de Uplift (levantamento) | Tectónica |
| **22** | Mid- to Late Holocene shoreline reconstruction and human occupation in Ancient Eretria (South Central Euboea, Greece) | Matthieu Ghilardi<br>David Psomiadis<br>Kosmas Pavlopoulos<br>Sylvie Müller Çelka<br>Sylvian Fachard<br>Thierry Theurillat<br>Samuel Verdan<br>Alex R. Knodell<br>Tatiana Theodoropoulou<br>Andrew Bicketi<br>Amandine Bonneau<br>Doriane Delanghe-Sabatier | 2014 | Estratigrafia costeira; Reconstrução da linha de costa | Geomor-fologia |
| **23** | Are microseismic ground displacements a significant geomorphic agent? | Matthew J. Brain<br>Nicholas J. Rosser<br>Emma C. Norman<br>David N. Petley | 2014 | Microsismicidade; movimentos de vertente; danos; queda de blocos | Geomor-fologia |

*Quadro 3.Materiais e métodos utilizados nos artigos selecionadas da revista Geomorphology.*

| N.º | Tema | Materiais e métodos | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Descrição | Recolha de dados | Trata-mento/ Análise de dados | SIG | Perfis esque-máticos | Modelos numéri-cos | L1 - GPS | L2- LiDAR | L3- Estação total |
| **1** | Geomor-fologia | Trabalho de campo (medição dos eixos); GPS; Micro-Drone; Cartografia (SIG); Elaboração de perfis esquemáticos. | X | X | X | X | | X | | |
| **2** | Geomor-fologia | Cartografia detalhada (SIG); Trabalho de campo (recolha de amostras); Análise de amostras (textura; minerologia; tamanho de grão; datação por OLS) de amostras; Elaboração de perfis esquemáticos. | X | X | X | X | | | | |
| **3** | Erosão | Trabalho de campo (recolha de amostras); Análise das amostras (volume; densidade relativa; ); Análises hidrométricas, e estatísticas. | X | X | | | | | | |
| **4** | Erosão | Proposta de um modelo (baseado numa versão simplificada de erosão em terraços estreitos, com base em várias hipóteses); Teste do modelo; Aplicação em dados de campo; Elaboração de perfis esquemáticos; | X | X | | X | X | | | |
| **5** | Erosão | Levantamentos com TLS e dGPS; Processamento de dados (criação do DEM, cálculo do recuo); Quantificação da margem de erro entre o DEM e as áreas (imobiliário). | | X | X | | | X | X | |

| N.º | Tema | Materiais e métodos | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Descrição | Recolha de dados | Trata-mento/ Análise de dados | SIG | Perfis esque-máticos | Modelos numéri-cos | L1 - GPS | L2- LiDAR | L3- Estação total |
| **6** | Geomor-fologia | Levantamentos topográficos e batimétricos com LiDAR; Análise dos dados LiDAR com base em estudos anteriores (fotografias aéreas e reconhecimento do terreno); Criação do DEM; Extração de perfis de praia (ArcGIS); Recolha de dados hidrodinâmicos (marés, altura significativa da onda, período do pico); Recolha de amostras; Análise das amostras (tamanho do grão); Caracterização das ondas ao quebrar; Classificação dos estados de praia com base no cálculo e avaliação do parâmetro Ω. | X | X | X | | | | X | |
| **7** | Erosão | Comparação de dois modelos, um com que considera a tectónica e outro de alterações climáticas); Construção de uma BD como amostras de estudos anteriores; Aplicação/Teste dos modelos nos dados da BD; Elaboração de perfis esquemáticos. | x | X | | X | X | | | |
| **8** | Erosão | Proposta de um modelo (que avalia os efeitos da subida do nível medio do mar nas plataformas da praia); Aplicação do mesmo à área de estudo a partir de levantamentos topo-batimétricos com LiDAR e dGPS; Elaboração de perfis esquemáticos; | X | X | X | X | X | X | X | |

| N.º | Tema | Materiais e métodos | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Descrição | Recolha de dados | Trata-mento/ Análise de dados | SIG | Perfis esque-máticos | Modelos númeri-cos | L1 - GPS | L2- LiDAR | L3- Estação total |
| **9** | Tectónica | Estudo geomorfológico (trabalho de campo - observação; identificação e examinação de elementos geomorfológicos); Elaboração de esboços geológicos, geomorfológicos, estruturais e perfis. | X | X | X | X | | | | |
| **10** | Erosão | Recolha de dados em várias fontes, mapas e fotografias aéreas dos séculos XIX e XX, LiDAR e GPS; Georreferenciação dos dados; Criação de perfis com 250m de intervalo de forma a cobrir toda a àrea de estudo; Aplicação do DSAS nas linhas de costa "históricas"; Aplicação de dois modelos estatísticos para prever a evolução da linha de costa com base nos resultados do modelo anterior. | X | X | X | | X | X | X | |
| **11** | Erosão | Levantamentos de campos; LiDAR; dGPS; Tratamento dos dados (eliminação de ruído, e remoção de erros); Recolha de dados oceanográficos e de precipitação; National Land Data Assimilation Systems, NLDAS; Elaboração de perfis esquemáticos; | X | X | X | | | X | X | |

| N.º | Tema | Materiais e métodos | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Descrição | Recolha de dados | Trata-mento/ Análise de dados | SIG | Perfis esque-máticos | Modelos númeri-cos | L1 - GPS | L2- LiDAR | L3- Estação total |
| **12** | Geomor-fologia | Trabalho de campo (em transectos com 220m e intervalados com 10-20m; medição do cumprimento e do declive médio do perfil da praia para cada transecto, com o uso de fita métrica, GPS e bússola com clinómetro; construção de um perfil de praia ao longo de cada transecto), Registo das medições dos eixos A, B e C da placa (laje; slab) de beachrock, localização no perfil, forma e aparência; Cálculo de volumes; Aplicação de equações hidrodinâmicas na área de estudo;Elaboração de perfis esquemáticos. | X | X | | X | | | | |
| **13** | Geomor-fologia | Recolha dados metereológicos (estação metereológica é composta por um anemómetro de ultra-sons, sensores de pressão e de temperatura); Recolha de dados oceanográficos e climáticos; Caraterização wave climate; Recolha de registo da Oscilação do Altântico Norte (NAO), e combinação com os dados do wave climate; Recolha de dados morfológicos com uso de RTK-GPS; Classificação da barreira exterior e resposta da praia; Elaboração de perfis esquemáticos; | X | X | | X | | X | | |

| N.º | Tema | Materiais e métodos | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Descrição | Recolha de dados | Trata-mento/ Análise de dados | SIG | Perfis esque-máticos | Modelos númeri-cos | L1 - GPS | L2- LiDAR | L3- Estação total |
| **14** | Erosão | Recolha de amostras (arenito, basalto, e argilitos); Uso das amostras em experiências de exposição e imersão em água salgada sintética por vários períodos de tempo; Análises dos dados recolhidos, e o seu estudo com as condições oceanográficas (regime da maré, altura e amplitude da maré) e altitude e localização geográfica (nível da maré baixa...); Aplicação do modelo proposto a seis áreas de estudo com regimes de marés distintas; Elaboração de perfis esquemáticos. | X | X | | X | X | | | |
| **15** | Geomor-fologia | Levantamentos topográficos com estação total; Recolha de amostras de sedimentos; Limpeza e análise das amostras (tamanho das partículas, composição); Georreferenciação de fotografias aéreas (a partir de pontos de controlo retirados com GPS, e edifícios); Análise das fotografias aéreas para complementar os levantamentos de campo para medir a largura da plataforma; Elaboração de perfis esquemáticos. | X | X | X | X | | | | X |

| N.º | Tema | Materiais e métodos | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Descrição | Recolha de dados | Trata-mento/ Análise de dados | SIG | Perfis esque-máticos | Modelos númeri-cos | L1 - GPS | L2- LiDAR | L3- Estação total |
| **16** | Tectónica | Trabalho de campo: recolha de amostras com gouge cores para estabelecer a estratigrafia; descrição litológica das amostras e registo no campo; A elevação de cada core foi retirada com um dGPS; Os perfis de nocthes submersos foram examinados através da prática de mergulho; Análise da textura das amostras, separação consoante o tamanho (cascalhos, areias e silte); medição da suscetibilidade magnética, datação por radiocarbono (...); Elaboração de perfis esquemáticos. | X | X | X | X | | X | | |
| **17** | Tectónica | Revisão de interpretações/estudos anteriores de marcadores do nível do mar e restrições neotectónicas; Apresentação de uma explicação alternativa com base nas mesmas evidências. | X | X | X | | X | | | |
| **18** | Erosão | Proposta de um modelo numérico com conjunto de funções que têm como objetivo capturar os processos inter-relacionados como desenvolvimento de notches, colapso da arriba, cominuição dos detritos ao longo do perfil da plataforma e da face da arriba; Revisão de outros modelos; Cálculos matématicos; Validação do modelo. | X | X | | | X | | | |

| N.º | Tema | Materiais e métodos | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Descrição | Recolha de dados | Trata-mento/ Análise de dados | SIG | Perfis esque-máticos | Modelos númeri-cos | L1 - GPS | L2- LiDAR | L3- Estação total |
| **19** | Geomor-fologia | Análise de dados: 1) um registo de longo das correntes de retorno, através dos incidentes registados pelos nadadores salvadores durante entre 2006-2010, juntamente com hindcast de um modelo de ondas, vento e alturas de marés, apoiados por imagens de vídeo e dados batimetricos da costa de Perranporth entre 2010-2012; 2) duas experiências de campo intensivas de curto prazo na praia Perranporth durante 2011, que compilou um conjunto de dados das correntes de retorno em Lagrangian, medindo-as através GPS-tracker drifters na zona de rebentação. Análise dos dados obtidos (condições ambientais, circulação da água da em Lagrangian; análise de comportamento; controlo das ondas e das marés na circulação; variabilidade morfológica; modos de circulação da corrente de retorno). | x | x | x | | | x | | |

| N.º | Tema | Materiais e métodos | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Descrição | Recolha de dados | Trata-mento/ Análise de dados | SIG | Perfis esque-máticos | Modelos númeri-cos | L1 - GPS | L2- LiDAR | L3- Estação total |
| **20** | Geomor-fologia | Levantamentos de campos; TLS - LiDAR; Processamento de dados; Análise dos dados (análise e alteração de detecção em 2D e 3D; Erosão da arriba e transferência de massa); Elaboração de perfis esquemáticos. | X | X | X | X | | | X | |
| **21** | Tectónica | Classificação e mapeamento dos terraços marinhos; Datação dos terraços (tephrostratigraphy) ; Recolha e análise de amostras (composição do grão, geoquímicas ) Determinação da taxa de soerguimento (com apoio ao RTK-GPS, e estação total); Análise de dados; Elaboração de perfis esquemáticos. | X | X | X | X | | X | | X |
| **22** | Geomor-fologia | Caracterização geológica e geomorfológica; Contexto regional e local do nível relativo do mar; Reconstrução paleoambiental (Recolha de amostras (vibracores); Cada buraco foi mapeado e medido com teodolito; Datação AMS; identificação de microfauna; Análise do tamanho do grão; Elaboração de perfis esquemáticos. | X | X | X | X | | | | |

| N.º | Tema | Materiais e métodos | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Descrição | Recolha de dados | Trata-mento/ Análise de dados | SIG | Perfis esque-máticos | Modelos numéri-cos | L1 - GPS | L2- LiDAR | L3- Estação total |
| **23** | Geomor-fologia | Reconsideração de um modelo proposto por outro autor; Avaliação alternativa dos movimentos microsísmicos como um eficaz processo geomorfológico em materiais frágeis; Registo de dados de deslocamentos miscrossísmicos numa arriba rochosa (sismómetro de banda larga); Recolha de dados metereológicos, hidrográficos e oceanográficos; Proposta de um modelo conceptual; Validação/ teste do modelo. | X | X | | | X | | | |

*Quadro 4. Artigos da Marine Geology sobre costas rochosas (12 agosto 2015).*

| N.º | Título | Ano | Autores | Keywords | Tema |
|---|---|---|---|---|---|
| **1** | Cliff notch formation along the sub-tropical La Paz Peninsula, Southern Baja California, Mexico | 2015 | Alan S. Trenhaile<br>Joel Gagnon<br>Kyle J. Prestanski<br>Neil I. Porter | Nocthes; Meteorização | Erosão |
| **2** | Quantifying the environmental controls on erosion of a hard rock cliff | 2015 | E.C. Vann Jones<br>N.J. Rosser<br>M.J. Brain<br>D.N. Petley | Queda de blocos; Erosão; Energia da onda | Erosão |
| **3** | Reprint of "Boulder transport by the 2011 Great East Japan tsunami: Comprehensive field observations and whither model predictions?" | 2014 | N.A.K. Nandasena<br>Norio Tanakaa<br>Yasushi Sasakia<br>Masahiko Osadaa | Modelação; Tsunami; Blocos | Geomorfologia |
| **4** | Beachrock: A tool for reconstructing relative sea level in the far-field | 2014 | Barbara Mauza<br>Matteo Vacchi<br>Andrew Green<br>Goesta Hoffmann<br>Andrew Cooperc | Reconstrução nível médio do mar | Geomorfologia |
| **5** | Effects of varied lithology on soft-cliff recession rates | 2014 | N.E. Carpenter<br>M.E. Dickson<br>M.J.A. Walkden<br>R.J. Nicholls<br>W. Powri | Erosão da arriba; Geomorfologia do litoral; Modelação | Erosão |
| **6** | Lagrangian observations of circulation on an embayed beach with headland rip currents | 2014 | R. Jak McCarroll<br>Robert W. Brander<br>Ian L. Turner<br>Hannah E. Power<br>Thomas R. Mortlock | Deriva; Morfologia; Topografia | Geomorfologia |
| **7** | Estimating cliff retreat in southern California considering sea level rise using a sand balance approach | 2014 | A.P. Young | Modelação de regressão da costa; Erosão | Erosão |

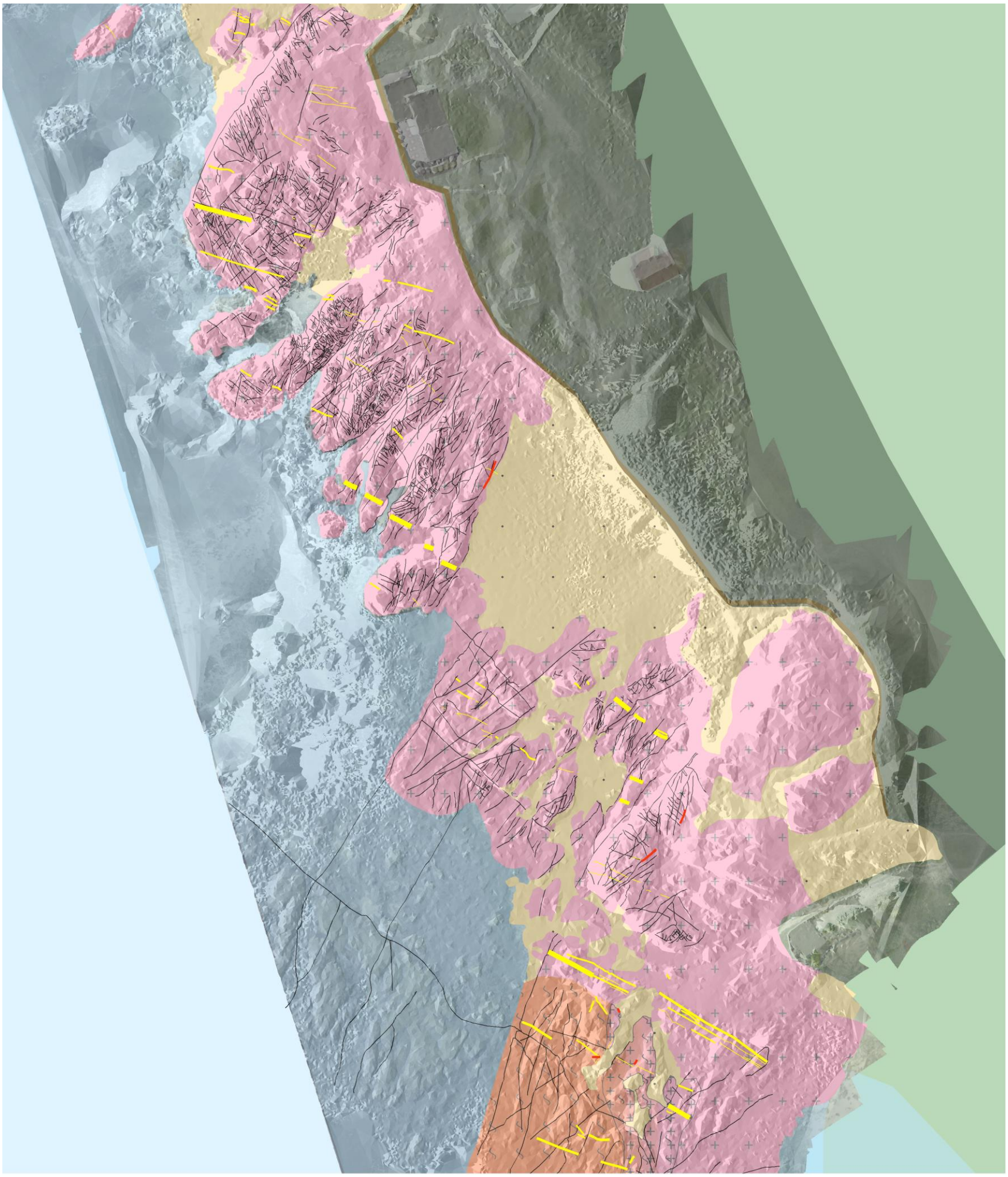
| N.º | Tema | Materiais e métodos | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Descrição | Recolha de dados | Trata-mento/ Análise de dados | SIG | Perfis esque-máticos | Modelos númeri-cos | L1 - GPS | L2- LiDAR | L3- Estação total |
| **1** | Erosão | Recolha de amostras com martelo e cinzel, e agrupadas po tamanho (pequeno, médio e grande); Tratamento das amostras; Determinar o processo de formação e erosão de notches, com experiências laboratoriais e análises geoquímicas. | x | x | | x | | | | |
| **2** | Erosão | Recolha de dados de campo: movimentos microsismicos na arriba em três eixos, com a utilizando um sismógrafo; dados oceanográficos (marés); TLS (para derivar volumes da queda de blocos através de levantamentos sequênciais, o que implica a geração de modelos digitais de superfície); Modelação da onda, utilizando uma transformação de um modelo, para estimar as condições locais da arriba com base em dados de ondas distais e marés. | x | x | x | x | x | | | |

| N.º | Tema | Materiais e métodos | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Descrição | Recolha de dados | Trata-mento/ Análise de dados | SIG | Perfis esque-máticos | Modelos númeri-cos | L1 - GPS | L2- LiDAR | L3- Estação total |
| **3** | Geomor-fologia | Medição de blocos com o eixo maior superior a 1m; Recolha de amostras para calcular densidade, massa. No local foram realizados testes para calcular coeficientes estátiticos, e frição dinâmica entre os calhaus no solo. Análise de fotografias (aéreas) captadas antes do tsunami, e observção direta, para ver a localização dos calhaus antes da deslocamento. Proposta de modelo (equações). Elaboração de perfis esquemáticos. | X | X | | X | X | | | |
| **4** | Geomor-fologia | Recolha e analise; SIG; GPS; GPR; Catodoluminescência (CL); Datação por Radiocarbono ou OLS Elaboração de perfis esquemáticos; | X | X | X | X | | X | | |
| **5** | Erosão | Apresenta modificações no modelo numérico Soft Cliff and Platform Erosion (SCAPE); Elaboração de perfis esquemáticos. | X | X | | X | X | | X | |

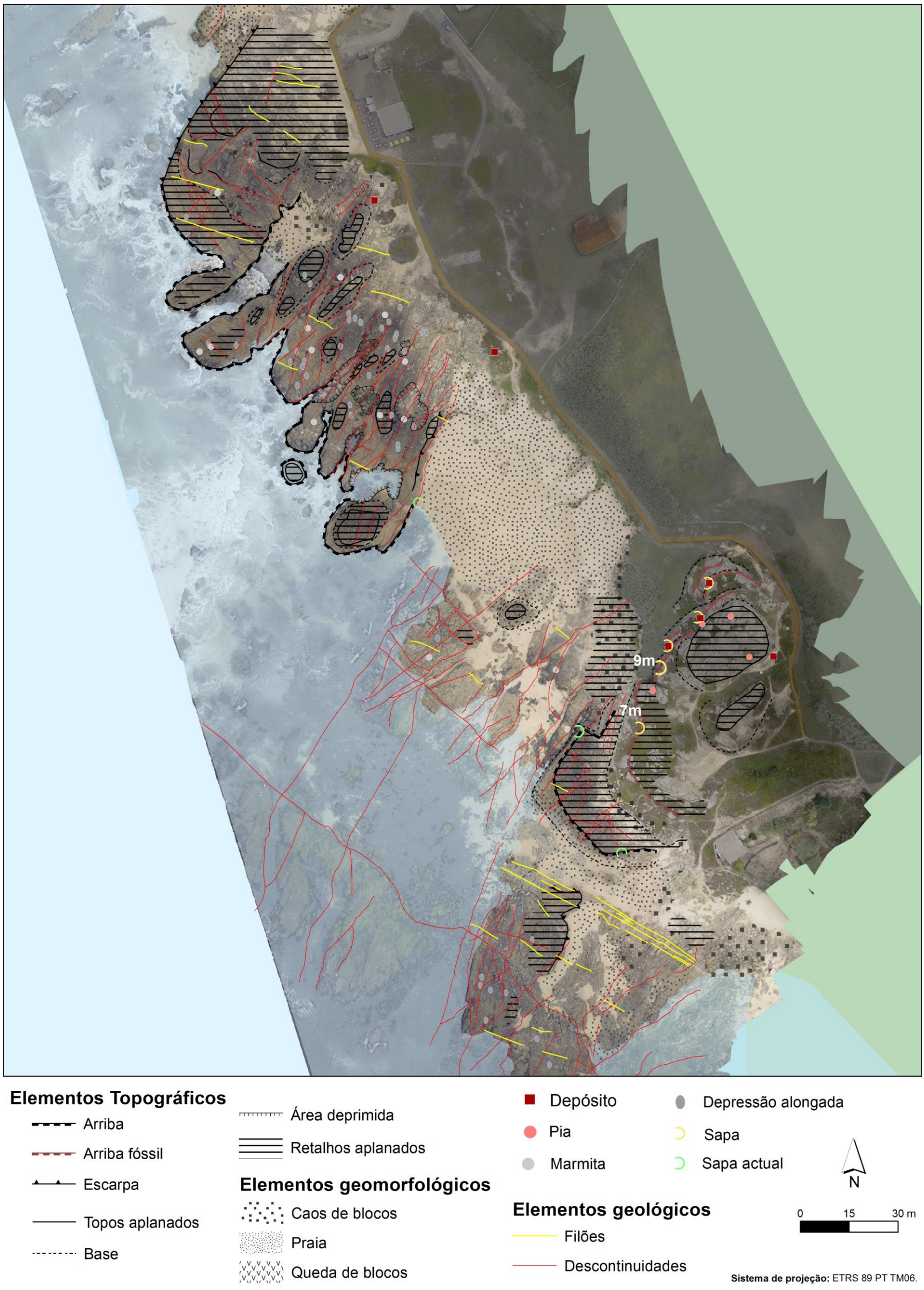
*Quadro 5. . Materiais e métodos utilizados nos artigos selecionadas da revista Marine Geology*

| N.º | Tema | Materiais e métodos | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Descrição | Recolha de dados | Trata-mento/ Análise de dados | SIG | Perfis esque-máticos | Modelos númeri-cos | L1 - GPS | L2- LiDAR | L3- Estação total |
| **6** | Geomor-fologia | Recolha de dados: levantamentos batimetricos com o apoio de motas de água equipadas com RTK-GPS e ecossonda; Levantamentos na praia e zona entremarés; Interpolação dos dados recolhidos (SIG); Levantamentos com estação total foram utilizados em promontórios, determinados a partir de cartas marítimas; Recolha de dados oceanográficos da bóia ondógrafo; Dados das correntes em Lagrangian foram coletados com o apoio GPS-drifters; Aplicação do modelo MIKE21 Spectral Wave (SW); Elaboração de perfis esquemáticos. | x | x | x | x | | x | | x |
| **7** | Erosão | Alterações a lei de Brunn (criando o *general conditionally decoupled profile model*); Foram definidos transectos a partir de cartografia digital elaborada a partir de dados LiDAR; SIG; Estimativa dos limites superior e inferior do perfil da praia como o nível de água num período de retorno de 10 anos; Ajustamentos ao perfil de praia e da arriba activa, a dissociação entre os perfis permitem ver a praia e a falésia a recuar em taxas diferentes; Avaliação de processos erosivo subaéreos; Teste do modelo em dados históricos, e em cenários futuros; Elaboração de perfis esquemáticos; | x | x | x | x | x | | | |

## Anexo 2: Cartografia temática




*Esboço geológico da área de S. Paio.*




*Esboço geomorfológico da área de S. Paio.*